



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**“DISEÑO DE UN BIORREACTOR PARA LA OBTENCIÓN DE  
BIOGÁS Y BIOABONO A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN  
EL CANTÓN PATATE”**

**Trabajo de titulación, previa la obtención del título de:**

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**AUTOR: ANDRÉS EDUARDO PAREDES BUENAÑO**

**TUTOR: ING. MARIA FERNANDA RIVERA**

**PATATE-ECUADOR**

**2015**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a todos quienes hicieron posible la realización de este proyecto, en especial a mi familia por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de este camino estudiantil y ayudarme a superar todas las adversidades que se han presentado a lo largo del mismo.*

## **RESPONSABILIDAD DE IDEAS**

*“Yo, Andrés Eduardo Paredes Buenaño, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenecen a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”*

---

*ANDRÉS EDUARDO PAREDES BUENAÑO*

**TRIBUNAL**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR PARA OBTENCIÓN DE BIOGÁS Y BIOABONO A PARTIR DE RESIDUOS ORGPANICOS DEL CANTON PATATE”**, de responsabilidad del señor Egresado Andrés Eduardo Paredes Buenaño, ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. María Fernanda Rivera  
**DIRECTORA DE TESIS**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Dr. Robert Cazar.  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

# ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 .....	1
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS. ....	1
1.2. BIOMASA .....	1
1.3. BIOGÁS .....	2
1.4. BIOABONO .....	4
1.5. CULTIVOS Y TIPOS DE FERMENTACIONES. ....	5
1.5.1. CULTIVO .....	6
1.5.2. FERMENTACIÓN .....	6
1.5.3. CÉLULAS Y MICROORGANISMOS ANAERÓBICOS. ....	6
1.5.4. CÉLULAS Y MICROORGANISMOS FACULTATIVOS. ....	6
1.5.5. DIGESTIÓN ANAERÓBICA. ....	7
1.5.5.1. PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	7
1.5.5.2. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. ....	7
1.6. BIORREACTOR .....	8
1.6.1. CLASIFICACIÓN OPERATIVA DE BIORREACTORES. ....	9
1.6.2. FACTORES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE UN BIORREACTOR .....	9
1.6.3. ESTRUCTURA DE UN BIORREACTOR. ....	12
1.6.4. BIORREACTOR DE CAMPANA FLOTANTE (TIPO HINDÚ) .....	18
1.6.4.1. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DE CAMPANA FLOTANTE. ....	19
1.6.5. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR. ....	22
1.7. MARCO CONCEPTUAL .....	27
CAPÍTULO 2 .....	28
2. MATERIALES Y MÉTODOS. ....	28
2.1. LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	28
2.2. METODOLOGÍA .....	28
2.2.1. TAMAÑO DE LA MUESTRA .....	29
2.2.2. SELECCIÓN DE MUESTRA. ....	29
2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA .....	30
2.2.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL SUSTRATO. ....	30
2.2.5. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL LA MEZCLA .....	31
2.2.6. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DELA MEZCLA. ....	32
2.2.7. DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES. ....	32
2.2.8. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALÓRICA DE LA MEZCLA. ....	33
2.2.9. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ARITMÉTICA. ....	35
2.2.10. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	36
2.3. MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA .....	37
2.4. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR ..	39
2.4.1. RESULTADOS DEL MOELO EXPERIMENTAL. ....	35

<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>44</b>
<b>3. DIMENSIONAMIENTO DEL BIORREACTOR.....</b>	<b>44</b>
3.1. <i>POBLACIÓN FUTURA</i> .....	44
3.2. <i>CANTIDAD TOTAL DE MEZCLA DE RESÍDUOS:</i> .....	44
3.3. <i>VOLUMEN DEL BIODIGESTOR</i> .....	45
3.4. <i>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</i> .....	46
3.5. <i>DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BIODIGESTOR</i> .....	47
3.6. <i>CÁMARA DE DIGESTIÓN</i> .....	48
3.7. <i>CÁMARA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA</i> .....	49
3.8. <i>DISEÑO DE LA CÚPULA</i> .....	50
3.10. <i>COMPUERTA DE LIMPIEZA</i> .....	51
3.11. <b>RESULTADOS.</b> .....	52
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>54</b>
4.1. <i>CONCLUSIONES</i> .....	54
4.2. <i>RECOMENDACIONES</i> .....	55
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>57</b>
<b>NETGRAFÍA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>GAD</b>	Gobierno Autónomo Descentralizado
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Ácido sulfhídrico
<b>° C</b>	Grados Centígrados
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>L/h</b>	Litros por hora
<b>m<sup>3</sup>/KwH</b>	Metros cúbicos por Kilowatts usados por hora
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metros cúbicos por hora
<b>kW</b>	Kilowatts
<b>PH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>DA</b>	Digestión anaerobia
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrógeno
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>C/N</b>	Relación Carbono-Nitrógeno
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>L</b>	Litros
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo
<b>INEC</b>	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
<b>TR</b>	Tiempo de retención hidráulico
<b>LCP</b>	Longitud de las cámaras de alimentación y descarga

<b>V</b>	Volumen del biorreactor
<b>H</b>	Altura del biorreactor
<b>Cd</b>	Carga diaria
<b>r</b>	Radio
<b>EMMAIT</b>	Empresa Mancomunada de Aseo Integral Patate-Pelileo
<b>UTM</b>	Sistema de coordenadas, Universal Transversal de Mercator
<b>Ppm</b>	Partes por millón
<b>Cal</b>	Calorías
<b>Cm</b>	Cantidad de mezcla
<b>hc</b>	Atura d la cúpula



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b>	<b>Estructura de un biorreactor.....</b>	<b>13</b>
<b>FIGURA 2:</b>	<b>Estructura de un biorreactor de campana móvil.....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 3:</b>	<b>Dimensiones típicas de un biorreactor de campana fija.....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 4:</b>	<b>Tasa de crecimiento poblacional del Cantón Patate.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 5:</b>	<b>Proyección poblacional de Patate.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 6:</b>	<b>Localización de la investigación.....</b>	<b>28</b>

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>TABLA 1:</b>	<b>Rendimiento del biogás como combustible.....</b>	<b>4</b>
<b>TABLA 2:</b>	<b>Dimensiones típicas de biorreactores de campana móvil.....</b>	<b>20</b>
<b>TABLA 3:</b>	<b>Producción de biogás.....</b>	<b>24</b>
<b>TABLA 4:</b>	<b>Determinación de temperatura.....</b>	<b>30</b>
<b>TABLA 5:</b>	<b>Determinación de la densidad de la mezcla.....</b>	<b>30</b>
<b>TABLA 6:</b>	<b>Determinación de la viscosidad de la mezcla .....</b>	<b>31</b>
<b>TABLA 7:</b>	<b>Determinación de la conductividad del sustrato.....</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 8:</b>	<b>Determinación de la sólidos totales disueltos.....</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 9:</b>	<b>Determinación del calor específico de la mezcla.....</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 10:</b>	<b>Determinación de la temperatura media aritmética.....</b>	<b>35</b>
<b>TABLA 11:</b>	<b>Datos experimentales para el dimensionamiento del biodigestor.....</b>	<b>39</b>
<b>TABLA 12:</b>	<b>Resultados experimentales a escala.....</b>	<b>40</b>
<b>TABLA 13:</b>	<b>Producción acumulativa de biogás.....</b>	<b>42</b>

## RESUMEN

En la presente investigación se diseñó un biorreactor para la obtención de biogás y bio-abono a partir de residuos orgánicos del cantón Patate, Provincia de Tungurahua.

Aplicando una técnica cuantitativa y experimental, se llevó a cabo un muestreo de los residuos orgánicos generados en la zona usando un recipiente estéril de 2 litros, botas de caucho y guantes. Se comenzó con la construcción de un modelo experimental a escala a para medir parámetros como la temperatura y el volumen de biogás producido a fin de determinar el tiempo de retención óptimo para el diseño del biorreactor bajo las condiciones más cercanas a la realidad posible, siendo éste de 47 días, luego de los cuales de determinó la presencia de biogás al lograr obtener una flama de color azul con el mismo.

La selección del tipo de biorreactor se realizó mediante un análisis económico, cantidad de residuos, así como del área disponible en la zona de estudio. El biorreactor de tipo Hindú (de campana fija) fue escogido a los parámetros necesarios del Cantón.

Las dimensiones finales obtenidas para el biorreactor son: Volumen del contenedor:  $97\text{m}^3$ ; Altura del Biorreactor: 3,5m, Altura final: 3,7m; Diámetro del reactor: 6m; Diámetro final: 6,2m, Altura (radio) de la cúpula; 1,5m; Cámaras de entrada y salida del biorreactor: 2.21m, con una producción diaria aproximada de  $492\text{m}^3$  de gas diariamente.

Con el diseño de este biorreactor y su posterior construcción, se busca minimizar los impactos ambientales producidos por los residuos orgánicos producidos, principalmente la generación de vectores contaminantes.

Se recomienda al Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Patate realizar la construcción de este biorreactor con el fin de lograr aprovechar dichos residuos convirtiéndolos en productos aprovechables por la comunidad.

<CANTÓN PATATE><PROVINCIA DE TUNGURAHUA><GENERACIÓN DE  
BIOGÁS><MINIMIZACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL><BIORREACTOR TIPO  
HINDÚ><VECTORES CONTAMINANTES><PROVINCIA DE  
TUNGURAHUA><DISEÑO DE UN BIORREACTOR>

## SUMMARY

This research study was conducted to design a bioreactor to obtain both, biogas and bio fertilizer from the organic waste in Patate Canton belonging to Tungurahua Province.

It was carried out a quantitative and experimental technique for carrying out a sampling of the organic waste generated in the area by using a 2 litter sterile jar, rubber boots and gloves. The process started by the construction of an experimental model to make it possible to measure parameters such as temperature and the volume of biogas produced in order to determine the optimal retention time in order to design the bioreactor under conditions as close as possible to reality, so, this time was in 47 subsequent days, when the presence of biogas was determined at the moment of obtaining a blue flame.

The selection of the type of bioreactor was conducted by an economic analysis, amount of waste, in the available area as well as in the study area, being the Hindu bioreactor type (thin bell) adjusting to the necessary parameters of the canton.

The final dimensions gathered from the bioreactor are: volume of the container  $97\text{m}^3$ , bioreactor height: 3.5m, Final height: 5m, Inlet and outlet chambers of the bioreactor: 2.21m, with a production of approximately  $492\text{ m}^3$  of gas daily.

The design and subsequent construction of this bioreactor is aimed to reduce the environmental impact caused by organic waste generated, mainly the pollutant vectors generation.

It is suggested that the Autonomous Decentralized Government of Patate canton makes the construction of this bioreactor in order to make a better usage os this waste, turning it into usable products for the community.

<CANTON> <PROVINCE OF TUNGURAHUA> <PATATE> <BIOGAS  
GENERATION> <BIOREACTOR> <MINIMIZING ENVIRONMENTAL IMPACT>  
<HINDU> <POLLUTANTS> <POLLUTANT VECTORS> <DESIGN OF A  
BIOREACTOR>

## **INTRODUCCIÓN.**

Debido al gran aumento de la población y la cantidad de residuos generados por la misma, se debe buscar nuevas alternativas para el tratamiento de dichos residuos a fin de minimizar los daños generados al medio ambiente.

Los biorreactores son una gran alternativa para dar un tratamiento adecuado a los residuos de carácter orgánico, ya sean animales o vegetales, debido al bajo nivel de complejidad en su implementación así como la oportunidad que nos brindan de obtener energía a un bajo costo ya que los materiales utilizados para su construcción son relativamente económicos.

Esta investigación se enfoca en el diseño de un biorreactor para la población del cantón Patate, en la provincia de Tungurahua, el cual servirá como una gran ayuda al tratamiento de los residuos orgánicos generados en la zona, minimizando la contaminación ambiental del lugar, además de brindar beneficios potenciales a la población. Uno ellos es la transformación de los residuos orgánicos generados en bioabono, fácilmente asimilable por los suelos de la zona y de gran ayuda a la zona agrícola del sector al proveer nutrientes necesarios a los cultivos, además de la obtención de biogás como producto de la degradación de estos residuos, el cual puede ser utilizado como una fuente de energía alternativa tanto para calefacción, cocina o en ciertos casos para la obtención de electricidad con un bajo impacto en el ambiente.

Por tanto vista esta necesidad se ha realizado la presente investigación con el fin de aportar a la comunidad dando un tratamiento alternativo a residuos que de otra forma tendrían un impacto negativo sobre el medio ambiente y brindándoles además productos aprovechables para la agricultura y fuentes de energía alternativas para su bienestar.

## **JUSTIFICACIÓN**

La falta de tratamiento de los residuos sólidos necesita una solución inmediata debido al alto nivel de contaminación y afecciones a la salud que esto genera, además, teniendo en cuenta que los tratamientos anaerobios han dado muy buenos resultados en este tema.

La investigación es viable desde el punto de vista económico ya que al ser un diseño no existe la restricción económica que requeriría un tema que contemple construcción y los gastos que sean necesarios serán costeados con recursos propios, sin embargo, de requerirse posteriormente su construcción, la zona cuenta con terrenos municipales los cuales podrían ser utilizados para la construcción del equipo; además se cuenta con acceso a todo tipo de información necesaria la cual será proporcionada por parte del GAD del Cantón Patate y el recurso humano, se cuenta con profesionales expertos en el tema, facilitando el apoyo necesario para la resolución de problemas que puedan surgir.

En los últimos años se han implementado diversos métodos para el tratamiento de residuos orgánicos, siendo la biodigestión anaerobia una de las más eficientes, por lo cual la investigación se basa en el aprovechamiento de las características de estos residuos mediante su tratamiento anaerobio, el cual ayuda en gran medida a disminuir su volumen, así como a la obtención de productos estables utilizables en la agricultura (bioabono) que cubre la necesidad de parte del sector agrícola del cantón; y, de biogás utilizable como una fuente alternativa de energía por parte de la comunidad del cantón, lo que permitirá contar con un ambiente más limpio y libre de residuos, alcanzando así una mejor calidad de vida de la comunidad y cantón en General.

La investigación brinda además una nueva técnica de tratamiento de residuos sólidos orgánicos en la zona, la cual además podrá ser utilizada en otros lugares aprovechando sus propiedades para disminuir la contaminación existente.

## **OBJETIVOS**

## **GENERAL**

- Diseñar un Biorreactor para obtener biogás y bioabono a partir de residuos orgánicos del Cantón Patate.

## **ESPECÍFICOS**

- Determinar el volumen de los residuos orgánicos generados en el Cantón Patate.
- Identificar la presencia de bacterias metanogénicas durante la degradación de los residuos orgánicos presentes en el reactor prototipo.
- Encontrar los parámetros óptimos de diseño para el biorreactor, para su dimensionamiento.
- Determinar la eficiencia de producción de biogás frente a la cantidad de desechos tratados.
- Ofrecer una alternativa para minimizar el impacto ambiental producido por la descarga de residuos sólidos en el relleno sanitario.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. MARCO TEÓRICO**

#### **1.1. RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.**

Los desechos orgánicos son el conjunto de desechos biológicos (material orgánico) producidos por los otros seres vivos.

Los residuos orgánicos son una parte muy importante de los desechos sólidos municipales en general, ya que la mayoría de éstos se originan principalmente dentro de los hogares, en las zonas de comercio, y de forma secundaria en instituciones y centros industriales.

##### **Características**

Los desechos orgánicos son desechos biodegradables los cuales pueden ser procesados en presencia de oxígeno para su compostaje, o en la ausencia de oxígeno a través de una digestión anaeróbica. Ambos métodos dan como resultado final un producto capaz de acondicionar los suelos, una especie de abono o fertilizante.

#### **1.2. BIOMASA**

Al hablar de biomasa nos referimos a toda la materia orgánica proveniente de árboles, plantas y/o desechos de animales que pueden ser convertidos en energía mediante distintos procesos; o las provenientes de la agricultura (residuos de cultivos.), materia proveniente de residuos madereros (de aserradero) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica, entre otros). Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego.

## **Clasificación.**

Atendiendo desde un punto de vista ecológico podemos encontrar biomاسas de distintos órdenes:

- Biomasa primaria: es la materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos (algas, plantas verdes y demás autótrofos). Este grupo comprende toda la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas así como residuos forestales.
- Biomasa secundaria: es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa generada por los autótrofos (primaria).
- Biomasa terciaria: es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, como sería el caso de la carne de los animales carnívoros los cuales se alimentan de los herbívoros (biomasa secundaria). (Méndez, 2008)

### **1.3. BIOGÁS**

El biogás es un gas combustible generado en medios naturales así como en dispositivos específicos a partir de las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores como las condiciones ambientales, generalmente en un ambiente anaeróbico. (DiBlaci, 2004)

- **Composición**

La composición del biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones ambientales en que se procesa, sin embargo los principales componentes del biogás ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

El metano es el principal componente del biogás y es componente que le brinda sus características combustibles. El metano es un gas muy combustible, incoloro e inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos prácticamente no contaminantes.

(Revolorio H. I., 2010)



- **Características.**

El biogás es un poco más liviano que el aire y cuenta con una temperatura de inflamación de cerca de 700° C, la temperatura de la llama alcanza unos 870° C. El biogás está compuesto por alrededor de 60% de Metano (CH<sub>4</sub>) y 40% de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). El biogás contiene la mínima cantidad de otros componentes, entre otros, 1% de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

El contenido de metano depende principalmente de la temperatura de fermentación. Con bajas temperatura de fermentación se obtiene un alto porcentaje de gas metano, pero las cantidades de gas son menores.

El porcentaje de metano además depende del material de fermentación llegando a alcanzar, en diferentes sustratos los siguientes valores aproximadamente:

Estiércol de gallina.....	60%
Estiércol de cerdo.....	67%
Estiércol de establo.....	55
Pasto.....	70%
Desperdicios de cocina.....	50%

(DiBlaci, 2004)

- **Uso.**

El biogás al ser mezclado con aire puede ser utilizado como una forma de energía alternativa al ser quemado en un amplio rango de artefactos, el cual llega a descomponerse en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Normalmente el requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para conseguir una buena combustión. (Lara A. P., 2011) (Lara E. S., 2011)

- **Biogás como combustible.**

Al ser utilizado como una fuente de energía para combustión, dentro de los principales artefactos que utilizan biogás, podemos nombrar:

**Tabla 1. Rendimiento del biogás como combustible**

<b>Artefacto</b>	<b>Consumo</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
Quemador de cocina	300-600 L/h	50-60
Lámpara a mantilla (60W)	120 – 170 L/h	30-50
Heladera	30 – 75 L/h	20-30
Motor a gas	0,5 m <sup>3</sup> /KwH	25-30
Quemador de 10 kW	2 m <sup>3</sup> /h	80-90
Infrarrojo de 200W	30 L/h	95-99
Cogenerador	1kW electricidad. 0,5 m/KWH 2kW térmica	Hasta 90

(Lara E. S., 2011)

#### **1.4. BIOABONO**

El Bioabono es un fertilizante que se origina tanto de animales, humanos, así como de restos vegetales de alimentos, restos de cultivos de hongos comestibles o cualquier otra fuente de materia orgánica y natural.

Es un fertilizante líquido con todas las características de los abonos orgánicos, el cual reemplaza con una amplia ventaja los abonos químicos y además proporciona al suelo una gran cantidad de efectos beneficios tanto para sus características físicas, así como químicas y biológicas.

- **Características.**

El bioabono está compuesto en gran parte por sustancias promotoras del crecimiento de las plantas como la creatina, auxina y ácido indol acético. Además proporciona una liberación, aunque lenta, de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros, por medio de reacciones químicas y biológicas del suelo, mejorando la fertilidad del mismo. (Proaño, 2008)

- **Uso.**

El Bioabono se utiliza principalmente para:

- Mejorar la estructura del suelo y estimular su granulación, facilitando la labranza de este.
- Aumentar la absorción del aire y agua en los diferentes tipos de suelos.
- Regular la temperatura del suelo y ayudar a disminuir la erosión y evaporación. (Proaño, 2008)

## **1.5. CULTIVOS Y TIPOS DE FERMENTACIONES.**

La cinética biológica, a pesar de ser similar a la cinética química, depende además de otros factores extra a más de la velocidad de reacción y las variables externas (en este caso variables climáticas), la cinética biológica toma en cuenta además las características intrínsecas del microorganismo a ser utilizado en la digestión anaerobia, la tasa de división celular y además el tipo de operación que se llevará a cabo. Por tal razón se debe definir el objetivo para el cual está destinado el uso del biorreactor, su modo de operación (continuo, semicontinuo o discontinuo) y que tipo de cultivo (sustrato y microorganismo) se va a utilizar.

Para contar con una relación biorreactor – sistema de cultivo óptimo, se debe estar acorde a ciertos objetivos:

- Minimizar las diferencias de concentración de nutrientes.
- mantener una temperatura constante, preferiblemente por sobre los 35°C
- Prevenir en lo posible la sedimentación de materiales.

### **1.5.1. CULTIVO**

Se conoce como cultivo a un bioproceso el cual normalmente es asociado a organismos o microorganismos superiores (bacterias), mediante el cual, bajo condiciones controladas, se logra aumentar el número de individuos presentes en una zona determinada.

### **1.5.2. FERMENTACIÓN**

Una fermentación es un bioproceso el cual se basa en la descomposición de la materia orgánica a compuestos orgánicos menos complejos, la cual es llevada a cabo por microorganismos fermentadores (principalmente hongos y bacterias eucariotas)

Dentro de los sistemas biológicos que determinan la cinética biológica (metabolismo celular) podemos nombrar:

### **1.5.3. CÉLULAS Y MICROORGANISMOS ANAERÓBICOS.**

En su mayoría se trata de bacterias; son microorganismos con un metabolismo degradativo, es decir que convierten macromoléculas en compuestos más sencillos, son organismos generalmente unicelulares, nutricionalmente autótrofos y cuyas células no utilizan la glucólisis para la respiración celular, en cambio, utilizan moléculas orgánicas generadas en el catabolismo como moléculas aceptoras de electrones en un proceso de respiración conocido como respiración oxidativa, en la cual esta molécula orgánica “aceptora” de electrones se ve reducida en un proceso conocido como fermentación a una molécula orgánica más sencilla.

### **1.5.4. CÉLULAS Y MICROORGANISMOS FACULTATIVOS.**

Este tipo de microorganismos tienen la capacidad de sobrevivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno. Son microorganismos de metabolismo mixto por lo que pueden tanto

degradar como construir moléculas orgánicas a partir de diferentes sustratos los cuales pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos.

#### **1.5.5. DIGESTIÓN ANAERÓBICA.**

La digestión anaeróbica es el proceso en el cual diferentes microorganismos descomponen material biodegradable (materia orgánica) en ausencia de oxígeno. Este proceso genera diversos gases, entre los cuales el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes, lo cual lleva a la producción de biogás. En los biorreactores se aprovecha esta liberación de gases para luego utilizar los mismos a manera de energía combustible. La intensidad y duración del proceso anaeróbico varían dependiendo de los diversos factores, entre los que se destacan la temperatura, tiempo de retención, concentración de residuos y el pH del material biodegradado.

##### **1.5.5.1. PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

Muchos microorganismos afectan la digestión anaerobia, incluyendo las bacterias que forman ácido acético y los archaea que forman metano. Estos organismos producen ciertos procesos químicos al convertir la biomasa a biogás y a descomponerla en bioabono (fertilizante líquido).

##### **1.5.5.2. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

La digestión anaerobia (DA) es un proceso que puede ser resumido en 4 etapas:

- **Etapas hidrolítica**

En esta etapa se debe hidrolizar los compuestos de mayor peso molecular, tanto los disueltos como los no disueltos, por medio de diferentes enzimas (por ejemplo amilasas y proteasas), en esta primera etapa se hidrolizan polímeros tales como polisacáridos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, dando como resultado la formación de sus correspondientes oligómeros y monómeros (azúcares, alcoholes, ácidos grasos, entre otros)

- **Etapa acidogénica**

La llevan a cabo bacterias acidogénicas las cuales logran transforman los oligómeros y monómeros formados en la etapa hidroítica a ácidos grasos volátiles (principalmente ácido acético, propiónico, butírico y valérico)

- **Etapa acetogénica**

Las bacterias acetogénicas en esta etapa transforman a los ácidos grasos volátiles formados en la etapa ecidogénica a ácido acético.

- **Etapa metanogénica**

Las bacterias metanogénicasacetoclastas transforman el ácido acético a metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), en esta cuarta etapa participan además bacterias conocidas como hidrogenotróficas, las cuales mantienen el equilibrio del hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) en el medio, utilizándolo para reducir el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a metano ( $\text{CH}_4$ ). (Basurto, 2013) (Lara A. P., 2011)

## **1.6. BIORREACTOR**

Un biorreactor es un depósito herméticamente cerrado donde los residuos orgánicos, o en su defecto el estiércol de los animales se fermentan en condiciones anaerobias a fin de producir biogás y un residuo líquido que se conoce como biol (bioabono). El mecanismo de trabajo básicamente consiste en alimentar el biorreactor con materiales orgánicos junto con agua, donde aproximadamente en un mes (tiempo variable dependiendo de las condiciones ambientales en las que se dé la digestión anaerobia), los procesos bioquímicos junto a la acción bacteriana producen la descomposición de la materia orgánica llegando hasta la producción de biogás y bioabono.

Estos recipientes normalmente son cilíndricos variando en tamaño desde algunos mililitros hasta varios metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ) y usualmente con construidos de acero inoxidable. El suelo del reactor está inclinado a fin de que los sedimentos que puedan formarse, así como la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque con mayor facilidad.

(Lara E. S., 2011) (Verdezoto, 2014)

### **1.6.1. CLASIFICACIÓN OPERATIVA DE BIORREACTORES.**

Hay tres maneras de clasificar los biorreactores en función del tipo de operación que éstos tienen.

- **Sistemas Batch o discontinuos.**

Es aquel sistema en cual no entra ni sale material durante el tiempo que sucede la reacción anaerobia, sino más bien, al inicio del proceso es cuando se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactivos no convertidos.

Este tipo de reactor es muy útil cuando se procesan tóxicos o componentes altamente potentes

- **Sistemas semicontínuos.**

Es aquel sistema en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material al reactor a fin de que sea transformado, esto en intervalos de tiempo determinados.

- **Sistemas contínuos**

En este tipo de sistema tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción

### **1.6.2. FACTORES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE UN BIORREACTOR**

La actividad metabólica de los microorganismos involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que los diferentes grupos de bacterias intervinientes responden de manera diferente a estos cambios, no es posible dar datos cuantitativos exactos sobre la afectación que estos factores producen.

Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se tienen los siguientes:

### ▪ **Temperatura**

En promedio, para que se inicie el proceso de metanogénesis se requiere una temperatura mínima de 4° a 5°C y no se debe sobrepasar los 70°C a fin de no matar las bacterias presentes.

Cabe destacar que la actividad biológica y por tanto la producción de biogás aumenta conforme aumenta la temperatura.

El cuidado en el mantenimiento también debe volverse más riguroso a medida que aumentamos la temperatura. Debe tenerse en cuenta que al no ser posible generar calor en el proceso, la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior, por lo que en lo posible debe escogerse un lugar con una temperatura ambiental un tanto cálida.

(Lara E. S., 2011)

### ▪ **Agitación y mezclado**

Los fines buscados al aplicar agitación al medio son: remoción de metabolitos producidos por bacterias metanogénicas, promover el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, homogeneizar la densidad bacteriana y evitar la formación de “espacios muertos” sin actividad biológica, buscando mejorar el proceso de digestión anaerobia y por tanto la degradación de los residuos orgánicos.

Existen varios mecanismos de agitación utilizados, desde lo más simple que consiste en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de líquidos, hasta sofisticados equipos que involucran agitadores de hélice, recirculadores de sustratos e inyectores a gas.

### ▪ **Tiempo de retención de biomasa.**

El tiempo de retención se refiere al tiempo (normalmente dado en días) durante el cual los residuos orgánicos van a permanecer degradándose dentro del reactor antes de que convertirse en bioabono y biogás; determinando.

El tiempo de retención se relaciona directamente con la velocidad a la cual la materia orgánica es degradada, y esta a su vez con la temperatura a la cual se realice dicho proceso (a



mayor temperatura existirá una velocidad de degradación de materia orgánica más rápida y por tanto el tiempo de retención de biomasa requerido será menor).

#### ▪ **Relación Carbono/Nitrógeno**

Para una correcta producción de biogás por parte de las bacterias metanogénicas presentes en el caldo de cultivo, debemos tener en cuenta que el Carbono y el Nitrógeno son elementos primordiales para su metabolismo, siendo el Carbono utilizado como una fuente de energía para las mismas, y el nitrógeno contribuyendo durante el proceso, a la formación de nuevas bacterias.

Idealmente se busca una relación C/N de 30:1 hasta 20:1, estos valores se dan ya que si el nitrógeno se encuentra en cantidad menor a la necesaria, la velocidad de producción de biogás por parte de las bacterias metanogénicas se verá reducida, mientras que si éste se encuentra en exceso podría existir una excesiva producción de amoníaco el cual a más de ser tóxico para el sistema actúa como inhibidor del proceso.

Por si solos cabe recalcar que los residuos orgánicos vegetales cuentan con gran cantidad de carbono, pero una cantidad baja de nitrógeno, mientras que si hablamos de desechos de excretas animales, estos contienen grandes cantidades de nitrógeno en su estructura, conteniendo carbono en mucha menor cantidad; por lo cual es necesario mezclar ambos tipos de residuos a fin de obtener una relación C/N para una óptima producción de biogas en el reactor. (Alkalay, 2014)

#### ▪ **Porcentaje de sólidos.**

Se ha demostrado, mediante estudios, que para que se produzca una digestión óptima en el reactor, debe contar con una carga de sólidos en el sistema que preferiblemente se encuentre entre el 7% y el 9%. (Alkalay, 2014)

#### ▪ **Inhibidores y promotores de la metanogénesis**

En este punto se han tenido muy buenos resultados en cuanto a promotores de la metanogénesis con carbonato de calcio y la urea. La urea acelera la producción de metano y

la degradación del material, mientras que el carbonato de calcio es útil para la generación de gas y aumentar el porcentaje de metano en el mismo.

Sustancias inhibidoras en muchas ocasiones pueden actuar como estimulantes si se utilizan en bajas concentraciones; en este grupo se pueden encontrar algunos cationes como: Sodio, Calcio, Potasio y Magnesio, los cuales normalmente se presentan al ser utilizados como controladores del pH. Cabe recalcar que si existe una mezcla de estos cationes, estos pueden actuar sinérgicamente incrementando la toxicidad total.

#### ▪ **Valor de pH**

Para una óptima operación del biorreactor se recomienda que el pH varíe entre 6,8 y 7,6, valores en los cuales se encuentra un buen índice ecológico ya que las variaciones en el valor de pH es indicativo de un fallo en el equilibrio entre las bacterias de la fase acidogénica y de la fase metanogénica.

Si existe un aumento significativo en el valor de pH se produce un exceso en la producción de amoníaco; mientras que si el valor de pH disminuye, aumenta la concentración de ácidos grasos en la mezcla los cuales actúan disminuyendo la acción de las bacterias metanogénicas presentes en el reactor, disminuyendo por tanto la producción general de biogas.

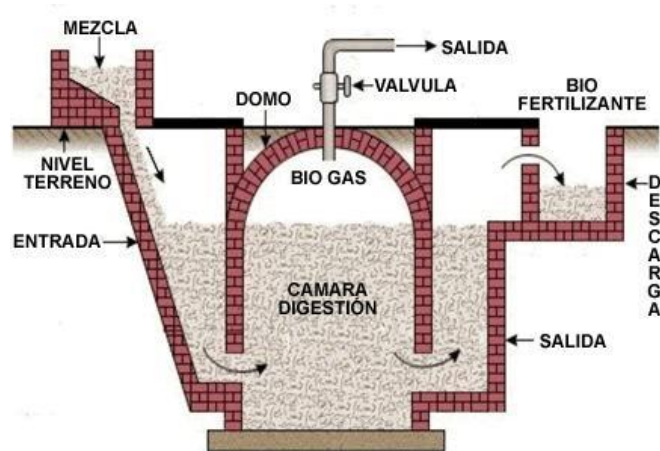
#### ▪ **Velocidad de carga volumétrica**

Este término se utiliza para designar el volumen del sustrato cargado diariamente al digestor, este valor tiene una relación inversa con el tiempo de retención dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

### **1.6.3. ESTRUCTURA DE UN BIORREACTOR.**

Los biorreactores usualmente emplean bacterias u otros organismos simples los cuales son lo suficientemente fuertes para resistir la fuerza de agitación interna del tanque, y también son fáciles de mantener debido a su requerimiento de nutrientes simples y que pueden crecer a grandes velocidades.

**Figura 1. Estructura de un biorreactor**



En la estructura básica de un biorreactor podemos considerar los siguientes elementos principales:

- **Tanque**

El tanque debe construirse con:

- Materiales no tóxicos, resistentes a la corrosión y capaces de soportar grandes presiones y temperaturas.
- Entrada y salida de gases.
- Entrada de medio de cultivo y salida de producto.
- Entrada para inoculación de alimento.
- Sistemas de agitación y panel de control. (Suárez, 2010)

- **Sistema de control de temperatura.**

Este sistema mantiene la temperatura estable y dentro de un rango óptimo preestablecido requerido por el cultivo al interior del reactor para su máximo crecimiento.

**Un sistema de control de temperatura normalmente consta de:**

Dos sistemas de intercambio de calor:

- **Serpentín:** Es un medio físico por el cual el calor es absorbido o transmitido al fluido interior del tanque, el tubo del serpentín debe ser preferiblemente delgado para garantizar una mejor conducción de calor.
- **Intercambiador de calor:** Es un dispositivo de que tanto genera calor como absorbe el calor excedente que pueda generarse.
- **Controlador de temperatura:** Es un sistema el cual ordena y regula la acción del motor que controla las válvulas encargadas de la circulación del líquido frío (para refrigeración) así como líquido caliente.
- **Sensor de temperatura:** Puede utilizarse un termómetro, pero es recomendable la utilización de una termocupla para medir la temperatura presente al interior del tanque.
- **Tuberías de conducción de agua:** Estas deben ubicarse ancladas en el interior de las paredes metálicas del reactor a fin de actuar como fluido térmico absorbiendo el calor excedente del interior del tanque, logrando enfriar el medio de cultivo interno.

▪ **Sistema de agitación:**

Los biorreactores normalmente cuentan tanto con un sistema interno de agitación así como un sistema de inyección interna de aire cuando sea necesario. El aire se inyecta al tanque desde la parte inferior del mismo y es distribuido mediante orificios ubicados simétricamente.

El sistema de agitación cuenta con entre cuatro y seis deflectores, los cuales tienen por finalidad generar mayor turbulencia y mayor mezclado en el cultivo al interior del tanque.

Un sistema de agitación normalmente cuenta con cuatro partes mecánicas que son:

- **Puerto de entrada del biorreactor:** Se conoce como puerto a la superficie física sobre la cual se instala un dispositivo de entrada o salida del biorreactor; el puerto es el medio por el cual se realizan ajustes o se fijan artefactos a la pared o superficie del tanque.
- **Motor impulsor:** El motor suministra la potencia necesaria al eje, este motor debe ser preferiblemente de inducción ya que se requiere que el biorreactor opere de forma continua durante todo el período de cultivo; debe trabajar bajo corriente alterna, la

potencia debe calcularse para ser capaz de manejar el doble de la potencia teórica requerida para agitar el cultivo en el interior del reactor.

El motor preferiblemente debe ser acorazado bajo una protección de acero inoxidable.

- **Eje transmisor de potencia:** Es una barra cilíndrica, normalmente entre  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ " de diámetro para facilitar el acople al motor, esta barra debe ser de acero inoxidable y su longitud depende de la profundidad del tanque.
- **Acople del eje:** Fija y ajusta el eje transmisor al motor.

- **Sello mecánico:**

Este sello presenta tres funciones: evitar la contaminación, mantener el sistema hermético y servir de amortiguador de fricción.

El sello mecánico debe además permitir la limpieza y desinfección in-situ del reactor mediante una línea de vapor.

El sello mecánico puede ser tanto de cartucho rígido como de cartucho flexible.

- **Cartucho rígido:** Permite el rodamiento del eje transmisor de potencia a través de un soporte ubicado en el cuerpo rígido de este sello, pero a la vez aísla el paso de cualquier material externo al interior del tanque.
- **Cartucho flexible:** Cuenta con la misma funcionabilidad del sello anterior, el eje se fija en un soporte rígido al interior pero flexible al interior del cuerpo del mismo.
- **Pileta de carga del afluente:** La pileta de carga es utilizada para depositar y homogenizar la mezcla con la que se alimenta el digestor. Esta pileta normalmente es pequeña y de poca profundidad, la mezcla pasa por uno o dos tubos, que la comunican con el digestor propiamente dicho.
- **Pileta y pozo de descarga del efluente:** El reactor deberá contar con la construcción de una laguna secundaria que capte los efluentes resultantes del biorreactor con una capacidad igual al volumen de agua saliente del sistema. La pileta y pozo se utilizan con el fin de descargar la mezcla ya procesada que sale del tanque digestor. Este pozo es hondo y su profundidad es mayor que la del tanque digestor. Por arriba cuenta con una abertura para que sea posible recoger y retirar los productos de la digestión anaerobia (bio-abono).

En un reactor pueden existir entre 3 y 5 tubos de extracción de materia sobre nadante que serán colocados a distintos niveles, o a su vez un único tubo con distintas válvulas ubicadas a distintos niveles para la extracción del mismo (Poggio, 2009) (Cáceres, 2010)

- **Separador de sólidos:** Dependiendo del sistema de manejo de excretas y de la cantidad de material sólido (contenido fibras y tamaño de los residuos) que puedan encontrarse en el afluente, se considerará la instalación de un separador de sólidos antes de ingresar al biodigestor.
- **Fosa de Mezclado:** Se considerará la instalación de ésta fosa con el fin de concentrar los influentes provenientes de la unidad productiva, ya sea aprovechando la gravedad o mediante sistemas de bombeo.
- **Sistemas de Tuberías:** La tubería del afluente se instalará para conectar el tanque de mezclado con la zona de entrada de alimentación del bioreactor. La tubería será dimensionada en función de la velocidad de carga volumétrica ( $\text{m}^3/\text{hr}$ ). El material de la tubería en su mayoría será PVC. Para el caso de la tubería del efluente, se considera también el gasto diario del mismo.  
  
Para la tubería de conducción de biogás, esta debe tener un espesor suficiente para soportar la presión de diseño del bioreactor. Por otra parte, se requiere además de un sistema de tuberías para la extracción de sólidos con el objetivo de remover el material dimensionado en el interior del digestor debido al proceso, para evitar que el conjunto de los cambios químicos y biológicos que se producen continuamente en las células vivas de un organismo disminuya el volumen de operación del biodigestor. (Lopez, 2011)
- **Colocación de puntos de muestreo:** Se deberá contar con puertos de muestreo del influente y efluente del sistema, que permita verificar las condiciones internas de funcionamiento del reactor como son: la temperatura interna, pH, y otros parámetros fisicoquímicos.

- **Medidor de biogás:** Este tipo de medidores son recomendables para conocer el volumen de biogás generado. Se recomienda instalar medidores digitales que cuenten con dispositivos tecnológicos que permitan incorporar y transferir los datos a computadoras de manera instantánea.
  
- **Filtro de retención de Ácido Sulfhídrico:** En aquellos sistemas que realicen el aprovechamiento de biogás para generar energía eléctrica o térmica, se deberá instalar un filtro para la retención del ácido sulfhídrico, debido a que éste tiene propiedades corrosivas y acorta el tiempo de vida útil de los equipos.
  
- **Sistema y almacenamiento de biogás:** Este sistema consta de una tubería conectada a la parte superior del tanque y que conduce al tanque de almacenamiento del gas, se deberá contar con una válvula de seguridad, una válvula de paso en la válvula de seguridad deberá introducirse lana de acero para eliminar el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) que se produce en el digestor y corroe el metal de los artefactos que utilizan el gas.  
 Normalmente el proceso de digestión en condiciones anaerobias produce entre 400 y 700 litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica degradada en el reactor, según las características del afluente. El contenido de metano de un biorreactor, normalmente varía entre el 65% y 70% en volumen, con una variación de CO<sub>2</sub> del 30% a 35%. (Cáceres, 2010) (Revolorio H. I., 2010)
  
- **Extracción de lodos:** Las tuberías de extracción de lodos normalmente suelen colocarse sobre bloques a lo largo del suelo inclinado del biorreactor. El lodo se extrae por el centro del reactor. Las tuberías normalmente tienen 15cm de diámetro y normalmente van equipadas con válvulas tampón a fin de evitar obstrucciones y se utilizan principalmente para llevar los lodos a un sistema de evacuación de lodos fuera del reactor.

#### **1.6.4. BIORREACTOR DE CAMPANA FLOTANTE (TIPO HINDÚ)**

Los biorreactores de campana flotante, junto con biorreactores de campana fija son las clases de reactores más utilizados a nivel mundial. A pesar de que los reactores de tipo hindú han sido menos aceptados que los de tipo chino, éstos presentan grandes ventajas a considerar al momento de su elección, por ejemplo:

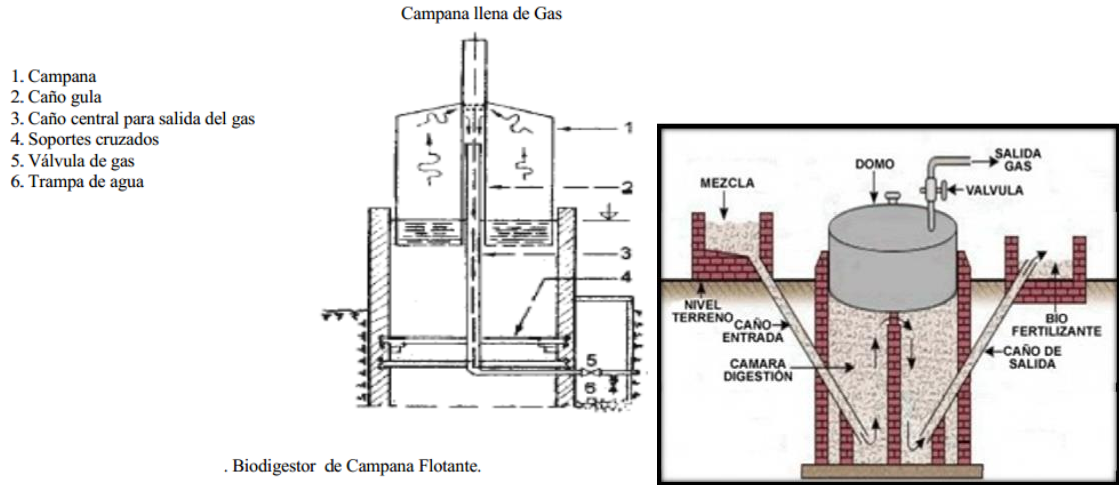
- Garantiza una presión de gas constante.
- Permite una operación de equipos eficiente.
- La movilidad de la campana ayuda al rompimiento de la espuma formada.
- Logra producciones volumétricas aproximadas entre 0,5 y 1m<sup>3</sup> de biogás al día.
- Los tiempos de operación de este tipo de reactores son muy menores de los tiempos empleados por reactores chinos (aproximadamente un tercio del tiempo, que podría ser 10 días) (Lara E. S., 2011) (Martinez, 2014)

Los biorreactores de campana flotante consisten en un tambor, originalmente construido de acero, pero después reemplazado, debido a su alto costo de construcción y altos niveles de corrosión, por fibra de vidrio reforzado en plástico, esta tambor puede flotar directamente sobre la masa en fermentación o a su vez sobre un anillo de agua, suministrando una presión constante de gas. Su manejo es fácil, pero, sobre todo la campana requiere un mantenimiento periódico debido a su exposición a la intemperie.

Normalmente un biorreactor de campana móvil se construye de manera vertical, utilizando para su construcción principalmente ladrillos, que pueden ser reforzados con concreto para mejorar su vida útil; el reactor se construye normalmente bajo suelo, siendo alimentado continuamente o semi-continuamente por una tubería de entrada que se ubicará a un extremo sobre el nivel del terreno. El gas producido se entrapa bajo la campana flotante, la cual sube y cae en una tubería central. La presión del gas normalmente varía entre 4 y 8cm de agua. (López, 2009)(Guevara, 1996)



**Figura2. Estructura de un biorreactor de campana móvil.**



#### 1.6.4.1. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DE CAMPANA FLOTANTE.

El principal objetivo del diseño de un biorreactor es el alcanzar una concentración de Se debe biomasa suficiente para obtener una alta producción de biogás y una alta reducción del volumen de materia orgánica dentro del reactor.

Un biodigestor de campana flotante está compuesto básicamente de 4 elementos:

- Sistema de entrada de material a ser digerido
- Cámara de digestión
- Sistema de descarga del efluente
- Depósito de gas

Para el diseño del reactor deberán detomarse en cuenta algunos factores, entre los que podemos destacar:

##### Ubicación

Se debe realizar un estudio previo y detallado de la zona a fin de lograr una ubicación de la construcción adecuada, considerando:

- La construcción debe ubicarse lo más cerca posible a la fuente de materia prima y a una fuente de agua tanto para la limpieza y mantenimiento del reactor así como para el mezclado.
- Debe buscar que en la zona de construcción se pueda realizar la carga al reactor por medio de gravedad.
- Debe evitarse, al momento de la excavación, el contacto con el manto freático a fin de evitar filtraciones al interior, así como la contaminación del manto mismo. (Guevara, 1996)

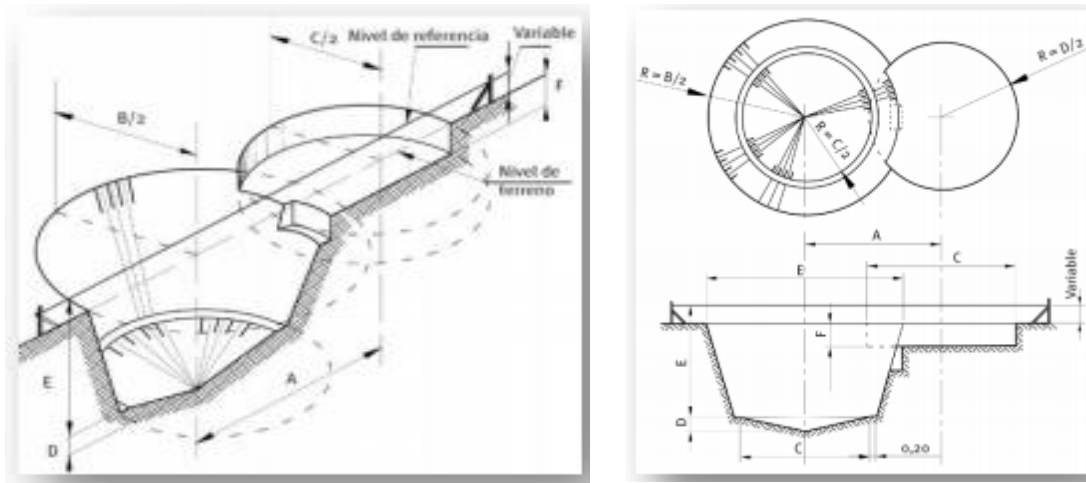
**Tabla 2. Dimensiones típicas de biorreactores de campana móvil.**

<b>Digestores típicos (m³)</b>	<b>Dimensiones principales de la excavación (m)</b>					
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
12	2,9	1,8	1,7	0,45	3,2	1,32
24	3,1	2,2	1,9	0,6	3,5	1,37
42	3,6	2,6	2,1	2,72	4	1,37

(Guevara, 1996)

Desde el inicio de la construcción, todas las medidas verticales deberán ser tomadas partiendo de un nivel de referencia, el cual deberá ser colocado sobre el nivel del terreno, aproximadamente a unos 50cm del mismo, con el fin de mantener niveles y medidas exactas. El nivel se traza mediante la utilización de dos estacas ubicadas a los extremos del reactor unidas con un nivel, el cual no deberá moverse durante toda la construcción a fin de evitar errores.

**Figura 3. Dimansiones típicas de un biorreactor de campana móvil**



(Gurdado 2007)

#### ▪ **Excavación**

Para la excavación, es preferible dejar paredes inclinadas a fin de evitar accidentes en el terreno, y esta puede ser realizada de forma manual o mecanizada, en dependencia del factor económico del que se disponga. Se recomienda abrir las zanjas para las tuberías de carga y descarga a la par de la excavación.

A fin de evitar errores y rellenos al final de la excavación, deberán tomarse medidas verticales a partir de la referencia cada ciertos períodos de tiempo, además de asegurarse de estar al menos a un metro sobre el nivel freático a fin de evitar filtraciones o contaminación.

La excavación deberá llevar de manera implícita la inclinación que deberá tener el fondo del reactor así como el gradiente que permitirá la comunicación entre el digestor y las otras estructuras adyacentes. (Guevara, 1996)

### 1.6.5. DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR.

Para realizar el dimensionamiento del biorreactor con una vida útil propuesta de 15 años, se procede a realizar la proyección poblacional del cantón Patate para dicha fecha, teniendo en cuenta los siguientes datos:

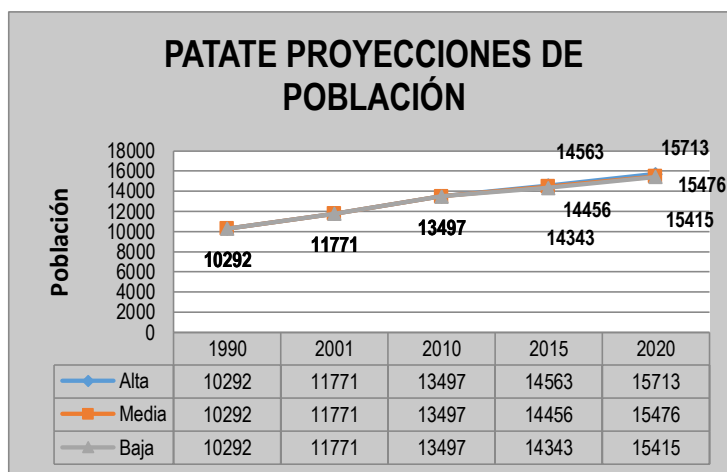
**Figura 4. Tasa de crecimiento población del Cantón Patate**



Fuente: INEC CPV 2010

Tasa de crecimiento poblacional: 1,52%

**Figura 5. Proyección Poblacional de Patate**



Fuente: INEC CPV 2010

Contando con una tasa de crecimiento poblacional (i) de 1,52%, y una población actual (según el último censo INEC 2010) de 13497 habitantes, podremos realizar una proyección poblacional, mediante la siguiente ecuación, tenemos:

$$P_f = P_o x (1 + \frac{i}{100})^T$$

Donde:

Pf: población proyectada.

Po: población actual

i: Tasa de crecimiento poblacional.

T: tiempo al que se proyecta la población.

### **CÁLCULO DEL VOLÚMEN DEL BIORREACTOR.**

El volumen del biorreactor los obtendremos con los datos del tiempo de retención y la cantidad de la mezcla total de los residuos orgánicos con la siguiente formula:

$$V = TR(DIAS) \times Cm \text{ (Cantidad de la mezcla)}$$

Cabe mencionar que la temperatura es la principal determinación del tiempo de retención.

Nota: Se debe añadir un volumen de seguridad (para almacenamiento del biogás generado) equivalente al 25% del volumen calculado del biorreactor.

$$V = V + (Vx, 25)$$

Donde:

V: volumen del tanque

## CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Basándonos en la tabla de la producción de gas que genera el estiércol de cada animal y la cantidad exacta de los residuos orgánicos obtendremos cuanto de gas se producirá en el biodigestor.

**TABLA 3. Producción de biogás**

<b>Rendimiento</b>	<b>Suma biogás m3/tn masa seca</b>
<b>ESTIÉRCOLES</b>	
cama de pollo	250,25
estiércol de pollo	431,2
estiércol de caballo	437,25
estiércol de vaca	183,6
estiércol de cerdos	279
<b>ENSILADOS</b>	
césped ensilado corto 1	502,97
maíz ensilado (lechoso) de baja calidad	385,11
girasol ensilado	344,1
sorgo completo o enhilado	558
<b>ALIMENTOS</b>	
melaza (caña)	642,85
colza (torta) de alta calidad	594,16
cebada (vinaza seca)	510,2
maíz (pulpa seca)	596,32
soja (harina de extracción de semillas)	634,25
<b>Granos</b>	
trigo verano granos	685,69
trigo invierno granos	687,59
maíz	678,47
soja (semillas)	694,06
girasol (semillas)	675,62
trigo (granos)	687,58
sorgo (granos)	672
<b>RESIDUOS</b>	
restos de cervecería	498,75
manzanas (pulpa)	582,9
orujo (húmedo)	565,25
pan	737,2
remolacha azucarera (pulpa)	285
melaza (de remolacha azucarera)	369,75
RSU (basura domiciliaria)	222
grasas de flotador	574
glicerina	841,5
aceite usado	870
<b>Productos de animales</b>	
suero	690
ricota	636,5
<b>Residuos de mataderos</b>	
carne (grasa incluida)	559
sangre	654,86

(OPSur, 2010)

Los residuos orgánicos a utilizarse son de procedencia animal (estiércol vacuno) así como residuos sólidos orgánicos domiciliarios, teniendo cada uno una producción de biogás de 0,1836 y 0,222 m<sup>3</sup> por kilogramo de residuo respectivamente.

## **DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BIODIGESTOR**

Teniendo una geometría circular y el volumen del biodigestor calculado se partirá a dimensionar las diferentes cámaras siendo que la forma ayuda que no se realice la pérdida de gas en las esquinas, facilitando que en su construcción requiera menor cantidad de materiales.

### **CÁMARA DE DIGESTIÓN.**

Teniendo el volumen procederemos al cálculo de la profundidad y el diámetro de la cámara de digestión tomando en cuenta que es circular, utilizando la siguiente ecuación por tanto:

Donde:

$$V = \frac{(\pi * d^2)}{4} \times h$$

V: volumen de la cámara de digestión.

D: diámetro de la cámara de digestión.

h: altura propuesta de la cámara de digestión.

### **CÁLCULO DE LA CÁMARA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA**

La forma de las cámaras de alimentación y descarga son de forma cuadrada facilitandola mezcla de los residuos con el agua para su cálculo se toma en cuenta la carga de mezcla diaria de residuos orgánicos generada mediante la siguiente ecuación.

$$Lcp = \sqrt[3]{Cd}$$

Donde:

$L_{cp}$ : longitud de la cámara de digestión

$C_d$ : carga diaria

## DISEÑO DE LA CÚPULA

### RADIO

$$r = \frac{d}{2} = \frac{6m}{2} = 3m$$

Unidad proporcional =  $r/4 = 3/4 = 0,75m$

Altura de la campana = 2 x Unidad proporcional

Altura de la campana = 2 x (3m/4) = 1,5m

## PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOABONO.

Para realizar el cálculo de la producción de bioabono se tomó el \_\_\_% de sólidos totales presentes en la mezcla. El cálculo de este parámetro viene dado mediante la resolución de la siguiente ecuación.

$$B_a = BD - (BD \times \frac{ST}{100})$$

Donde:

**$B_a$** : Cantidad de bioabono producido diariamente.

**$BD$** : Cantidad de biomasa disponible

**$ST$** : Sólidos totales presentes en la mezcla. (Tarco, 2011)



## 1.7. MARCO CONCEPTUAL

**Orgánico:** Materia componente de los seres vivos o procedente de la materia viva, constituido de Carbono principalmente, Oxígeno e Hidrógeno

**Digestión:** Proceso por el cual una sustancia es transformada, en otra sustancia más simple de características distintas a la original.

**Anaerobio:** Que sucede en ausencia de oxígeno

**Fertilizante:** Sustancia que mejora la calidad de la tierra y facilita el crecimiento de las plantas.

**Efluente:** Líquido residual que fluye de una instalación

**Afluente:** Líquido residual que fluye hacia una instalación

**Mancomunada:** Que debe ser cumplido por dos o más deudores, cada uno en su parte correspondiente

**Biodegradable:** Que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como, las bacterias, las plantas o los animales.

**Compostaje:** Proceso de tratamiento de la materia orgánica para acelerar su descomposición y ser utilizada como fertilizante.

**Combustión:** Reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama.

**Hidrólisis:** Reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.

**Metabolismo:** Conjunto de los cambios químicos y biológicos que se producen continuamente en las células vivas de un organismo.

## CAPÍTULO 2

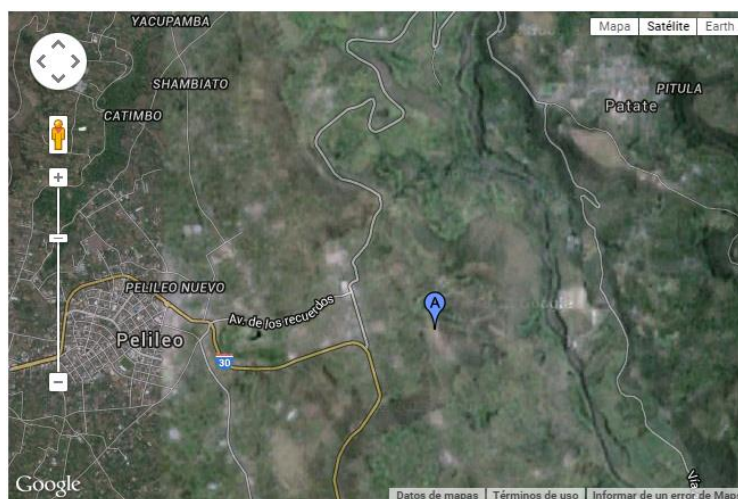
### 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 2.1. Diseño Experimental.

##### 2.1.1. Localización de la investigación.

El lugar de la investigación se lleva a cabo en la vía Pelileo-Patate en el Relleno Sanitario de la Empresa Mancomunada de Aseo Integral Patate-Pelileo de la provincia de Tungurahua, ubicado en las coordenadas UTM: **17M 775835 9852882**

**Figura 6. Localización de la investigación.**



(Google maps 2015)

El relleno sanitario se encuentra ubicado a 2367msnm en la parte baja de un sector montañoso con temperaturas que oscilan entre los 13 y los 26°C.

#### 2.2. Metodología

##### 2.2.1. Tamaño de la muestra

La muestra con la que se va a tratar en este trabajo consta de 1913 kg/recolección de residuos orgánicos generados, los cuales no son utilizados para compostaje sino colocados en un relleno, sin embargo para realizar los cálculos experimentales se considera una

muestra que consiste en 0,3 kg de estiércol de ganado vacuno, 1 kg de residuos sólidos orgánicos tomados de la recolección de basura del mismo día, considerando que es una muestra representativa y suficiente para lograr resultados precisos y que reflejen de la mejor manera las condiciones de la población de estudio de la zona.

### **2.2.2. Selección de muestra.**

La selección de la muestra se realiza in-situ, tomando los residuos orgánicos recolectados en el mismo día de la toma de la muestra a fin de garantizar la menor degradación posible de los mismos por parte de agentes externos. La selección de la muestra se da de manera totalmente aleatoria basada en el criterio del investigador debido a que la población de estudio es mayormente homogénea en cuanto a su composición y una muestra aleatoria no presentaría un inconveniente para representar la naturaleza general de la población a estudiar.

- **Materiales:**

- Guantes de látex.
- Botas de caucho.
- Recipiente de 3 litros.
- Fundas plásticas.
- Mandil.

### 2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA

**Tabla 4. Determinación de la temperatura**

<b>Fundamento</b>	<b>Materiales</b>	<b>Técnica</b>
La temperatura influye directamente en la velocidad de degradación de la materia orgánica al incrementar exponencialmente la actividad bacteriana. Las temperaturas son moderadamente altas ya que si la temperatura es muy alta (por sobre los 80°C) el calor afecta su capacidad de degradación e incluso puede llegar a destruirlas, mientras que temperaturas muy bajas las inhibe en su proceso de degradación.	- Termómetro digital.	Manual y observación

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

### 2.2.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MEZCLA.

**Tabla 5. Determinación de la densidad de la mezcla**

<b>FUNDAMENTO</b>	<b>MATERIALES</b>	<b>UNIDADES</b>
La densidad del sustrato resultante de la descomposición de la materia orgánica determina la cantidad de masa de sustrato que se encuentra contenida en un determinado volumen de muestra del mismo.	- Densímetro 10ml. - Probeta 50ml. - Balanza analítica.	Kg/m <sup>3</sup>

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

**Procedimiento:**

1. Luego de calibrar la balanza analítica, se pesó el densímetro vacío.
2. Se tomó una muestra del líquido en la probeta y se procedió a colocarla en el densímetro hasta llenarlo.
3. Se pesó el densímetro lleno en la balanza analítica.
4. Por diferencia de masa y un volumen conocido se calculó la densidad de la sustancia.

**2.2.5. DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LA MEZCLA****Tabla 6. Determinación de la viscosidad de la mezcla**

<b>FUNDAMENTO</b>	<b>MÉTODO, MATERIALES</b>	<b>UNIDAD</b>
La viscosidad en términos generales es la resistencia que presenta un líquido a fluir. Podemos definirla como el rozamiento interno entre capas propias de un fluido. A causa de la viscosidad es necesario ejercer una mayor o menor fuerza sobre una capa del fluido para que esta se deslice sobre otra.	Método de la caída libre:  - Canicas de vidrio (2). - Probeta 250ml. - Cronómetro digital.	Stockes  $\mu = \frac{2g(\rho_{sol} - \rho_{liq})r^2}{9v}$

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

**Procedimiento:**

1. Se midió el diámetro y pesó cada una de las canicas.
2. Con los datos anteriores se procedió a calcular el volumen de cada canica.
3. Se llenó la probeta de 250ml y se midió la altura de la columna del líquido.

4. Se procedió a soltar una de las canicas y cronometrar su caída hasta la base de la probeta.
5. Con la densidad conocida se procedió a calcular la viscosidad mediante la fórmula antes mencionada.
6. Se repitió el proceso con la otra canica para minimizar errores.

## 2.2.6. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE LA MEZCLA.

**Tabla 7. Determinación de la conductividad térmica de la mezcla.**

FUNDAMENTO	Instrumento	UNIDAD
<p>La conductividad térmica de un material mide la capacidad de conducción de calor de éste. Podemos decir que es la capacidad de una sustancia de transmitir energía cinética de sus moléculas a otras o a otra sustancia.</p> <p>El coeficiente de conductividad térmica expresa la cantidad de calor por unidad de tiempo que pasa a través de la superficie de una sustancia.</p>	Conductímetro	mS

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

## 2.2.7. DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.

**Tabla 8. Determinación de los sólidos disueltos totales.**

FUNDAMENTO	MATERIALES	UNIDAD
Los sólidos disueltos totales hacen referencia a la medida del total de todas las sustancias (menores a 2µm) presentes en una solución acuosa.	<p>- Conductímetro.</p> <p>- Vaso de precipitación de 250ml</p>	ppm

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

Procedimiento:

1. Se procedió a verter el líquido en un vaso de precipitación.
2. Se realizó la medición de la conductividad de la sustancia.
3. Se realizó la conversión de la misma (ms) a ppm de sólidos disueltos totales.

## 2.2.8. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALÓRICA DE LA MEZCLA.

**Tabla 9. Determinación del calor específico de la mezcla.**

FUNDAMENTO	MATERIALES	ECUACIONES y UNIDADES
<p>El calor específico es una magnitud física que mide la energía necesaria para aumentar la temperatura de dicho cuerpo en una unidad de temperatura, presenta una mayor o menor dificultad de que este cuerpo varíe su temperatura bajo la influencia del calor.</p> <p>Cabe recalcar que es una propiedad que no solo depende del tipo de sustancia sino también de la cantidad de sustancia sobre la cual realicemos el estudio.</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Calorímetro.</li><li>- Estufa eléctrica.</li><li>- Vasos de precipitación 250ml (2)</li></ul>	<p>Cal/g.K</p>

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

Procedimiento:

Primero se realizó el cálculo de la constante del calorímetro

1. Se pesó en la balanza analítica 100g de agua fría y se los colocó en el calorímetro midiendo su temperatura.

2. Se pesaron 100g más de agua y de los calentó hasta alcanzar los 80°C.
3. Se vertió el agua caliente en el calorímetro y se dejó reposar por un minuto hasta alcanzar equilibrio en la temperatura interna del calorímetro.
4. Se midió la temperatura y se procedió a realizar el cálculo de la constante del calorímetro mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{m_2 S_{H_2O} (T_2 - T_f) - m_1 S_{H_2O} (T_1 - T_f)}{T_f - T_1}$$

Donde:

$m_2$  =Masa del agua caliente.

$S_{H_2O}$  =Calor específico del agua ( $4,184 \frac{J}{g.^{\circ}C}$ )

$T_2$  = Temperatura del agua caliente.

$T_1$  = Temperatura del agua fría.

$T_f$  = Temperatura de equilibrio alcanzada

Calor específico de la sustancia.

1. Se pesó en la balanza analítica 100g de agua fría y se los colocó en el calorímetro midiendo su temperatura.
2. Se pesaron 100g de nuestro líquido y de los calentó hasta alcanzar los 80°C.
3. Se vertió nuestro líquido caliente en el calorímetro y se dejó reposar por un minuto hasta alcanzar equilibrio en la temperatura interna del calorímetro.
4. Se midió la temperatura y se procedió a realizar el cálculo del calor específico de la sustancia mediante la siguiente ecuación:



$$S_{sust} = \frac{(T_f - T_1) - [(m_1 \times S_{H_2O}) + C]}{(T_f - T_2)m_2}$$

Donde:

$m_2$  = Masa de la sustancia caliente.

$S_{H_2O}$  = Calor específico del agua ( $4,184 \frac{J}{g \cdot ^\circ C}$ )

$T_2$  = Temperatura de la sustancia caliente.

$T_1$  = Temperatura del agua fría.

$T_f$  = Temperatura de equilibrio alcanzada.

$C$  = Constante del Calorímetro.

## 2.2.9. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ARITMÉTICA.

**Tabla 10. Determinación de la temperatura media aritmética.**

FUNDAMENTO	MÉTODO	UNIDAD
Es la temperatura media medida en los fermentadores cuando se presenta una Temperatura que se mantiene constante durante el proceso de fermentación y dos temperaturas adicionales, una de entrada y otra de salida.	Termómetro	$\Delta T_A = \frac{2T_F - (T_1 + T_2)}{2}$

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

## 2.2.10. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

### Tipo de investigación

El tipo de investigación propuesto es de tipo experimental ya que los objetivos de la investigación se basan en la manipulación de la Cantidad de residuos orgánicos generados en el Cantón Patate a fin de conocer los efectos que esta tiene sobre la cantidad generada de biogás y bioabono mediante la fermentación anaerobia de los mismos.

### Diseño

Por cuanto la investigación es de enfoque cuantitativo, requiere de un experimento ya que se da una selección de sujetos al azar, asignación aleatoria de sujetos a grupos, asignación de tratamientos a grupos, y sobre todo porque el grado de control sobre las variables es alto.

Por lo tanto se plantea un diseño con post-prueba y sin grupo de control:

$$RG_1 - X_1O_2$$

### Dónde:

**RG1:** Grupo experimentales de residuos sólidos orgánicos seleccionados al azar.

**O1:** Mediciones previa a la manipulación de la variable independiente.

**X1:** Tratamiento de los residuos sólidos orgánicos en el bioreactor

**O2:** Medición de la cantidad de biogás y bioabono obtenidos a partir del tratamiento de los residuos sólidos orgánicos en el bioreactor.

### Unidad de análisis

El objeto de estudio de la investigación son todos los residuos sólidos orgánicos generados en el Cantón Patate, provincia de Tungurahua, los cuales se encuentran bajo la jurisdicción de la Empresa Mancomunada de Aseo Integral Patate-Pelileo.

## **Población de estudio**

La población a ser estudiada consiste en los residuos orgánicos generados por los habitantes del Cantón Patate, provincia de Tungurahua, los cuales son recolectados y destinados a un relleno sanitario bajo el mando de la Empresa Mancomunada de Aseo Integral Patate-Pelileo, de los cuales una parte se encuentran destinados a la realización de compost para uso de las comunidades aledañas, pero en su mayoría bajo suelo a una temperatura que va entre los 28°C y que presentan un desfogue de gases mediante tuberías verticales que eliminan los mismos hacia la atmósfera, convirtiéndose en un gran foco de contaminación.

### **2.3. MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA**

Con el fin de obtener datos reales sobre el tiempo de retención óptimo para la degradación de los residuos orgánicos, así como la producción de biogás, se construyó un modelo experimental a escala, utilizando los siguientes materiales:

- Residuos orgánicos (vegetales y animales), agua
- Recipiente plástico de 4 litros (galón)
- Manguera plástica
- Elástico
- Paja
- Tierra
- Masetero
- Espuma aluminizada
- Probeta 500ml
- Termómetro digital de alto rango.
- Fosforera

#### **Procedimiento**

1. Una vez pesado 1kg de residuos orgánicos (vegetales más animales) se los mezcló con 800ml de agua, buscando una relación aproximada de 1:1 sólidos-

líquidos, al tener en cuenta que los residuos orgánicos contienen una buena parte de agua.

2. En la tapa del recipiente plástico se realizaron dos agujeros, en los cuales, por el de mayor diámetro se atravesó la manguera plástica, la cual sería utilizada para la medición del biogás generado; en el agujero de menor diámetro se colocó la cabeza del termómetro a fin de obtener una medida clara del interior del reactor.
3. Se colocó al recipiente dentro de la maseta con aproximadamente 20cm de tierra al fondo como aislante térmico.
4. Se envolvió al recipiente con espuma aluminizada (con la cara aluminizada hacia el interior, posteriormente se lo recubrió de paja y se lo tapó con tierra, dejando aproximadamente 15 cm del recipiente al aire libre a fin de que sea capaz de recibir los suficientes rayos solares para aumentar su temperatura interna.
5. Se colocó la mezcla de residuos orgánicos y agua dentro del recipiente plástico y se agitó a fin de homogeneizar la mezcla.
6. Las mediciones del biogás fueron tomadas con una técnica de probeta invertida a fin de determinar su volumen por desplazamiento de agua.
7. La prueba de flama se realizó tres veces a lo largo del proceso mediante el encendido de una fuente de calor (fosforera) en la boca de la manguera a fin de presenciar el encendido del biogás presente.

## 2.4. DATOS EXPERIMENTALES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR

Tabla 11.

Datos experimentales para el dimensionamiento del biodigestor.

Propiedad	Valor
Densidad	$0,990 \frac{g}{cm^3}$
Viscosidad	$22,6 \frac{g}{cm.s}$
Conductividad	$72,5 mS$
Sólidos disueltos totales	$640 ppm$
Temperatura media aritmética	$19,6^{\circ}C$
Calor específico	$5,5242 \frac{J}{g^{\circ}C}$

Autor: Andrés Paredes Buenaño.

### 2.4.1. Resultados del modelo experimental

Se realizó la construcción de un modelo de un biorreactor a escala con el fin de obtener datos reales de la descomposición de los residuos orgánicos así como la producción de biogás bajo condiciones lo más controladas y similares a lo real posibles.

El modelo experimental se realizó en un recipiente de plástico (PET), el cual fue enterrado a una profundidad de 20 centímetros y recubierto con aislantes térmicos, como fueron paja y espuma aluminizada recubriendo el plástico y permitiendo el rebote de rayos solares al interior de la mezcla para un mejor mantenimiento del calor.

Se realizaron mediciones diarias de la producción de biogás así como mediciones tres veces al día de la temperatura al interior del biorreactor a fin de obtener un promedio de temperatura más exacto, obteniendo los siguientes resultados:

**TABLA 12.**  
**RESULTADOS EXPERIMENTALES A ESCALA.**

Día	Fecha	Temperatura (°C)			Temperatura media	Producción de biogás
		1pm	4pm	7pm		
1	16/03/2015	31,5	26,4	20,4	26	0
2	17/03/2015	44,5	33,4	20,1	33	0
3	18/03/2015	27,3	47,3	21,3	32	20
4	19/03/2015	19,8	19,7	17,3	19	85
5	20/03/2015	24,5	19,6	15,4	20	285
6	21/03/2015	17,7	17,2	15,3	17	645
7	22/03/2015	54,3	28,4	19,7	34	1035
8	23/03/2015	27,8	24,2	19,3	24	1585
9	24/03/2015	54,1	36,4	18,2	36	2240
10	25/03/2015	31,4	26,1	17,6	25	3070
11	26/03/2015	37,2	25,8	19,8	28	4320
12	27/03/2015	32,1	38,5	17,3	29	5670
13	28/03/2015	29,7	23,6	18,7	24	6450
14	29/03/2015	18	18,5	16,6	18	7680
15	30/03/2015	45,7	57,3	19,2	41	8610
16	31/03/2015	27	29,2	16,4	24	9470
17	01/04/2015	21,3	54,2	18,3	31	10250
18	02/04/2015	24,8	47,2	19,6	31	10250
19	03/04/2015	19,1	21,1	20,1	20	10250
20	04/04/2015	45,3	35,2	19,1	33	10250
21	05/04/2015	24,6	31,6	20,5	26	10250
22	06/04/2015	33,5	37,4	17	29	11100
23	07/04/2015	41,5	46,7	21,3	37	11560
24	08/04/2015	25,6	32,7	18,2	26	11880
25	09/04/2015	39,5	42,3	17,4	33	12230

26	10/04/2015	25;9	40;7	16;8	28	12650
27	11/04/2015	26;4	30;5	18;2	25	13060
28	12/04/2015	37;3	41;9	20;2	33	13410
29	13/04/2015	42;9	36;6	22;5	34	13810
30	14/04/2015	32;5	27;7	19;2	26	14230
31	15/04/2015	42;7	36;8	18;7	33	14700
32	16/04/2015	40;5	46;7	19;4	36	15120
33	17/04/2015	32;1	24;9	21;4	26	15470
34	18/04/2015	28;6	23;4	20;3	24	15845
35	19/04/2015	34;1	38;6	21;8	32	16260
36	20/04/2015	43;8	38;3	21;2	34	16680
37	21/04/2015	23;3	20;3	19;2	21	17000
38	22/04/2015	38;3	37;2	20;1	32	17360
39	23/04/2015	26;8	48;6	17;1	31	17700
40	24/04/2015	42;5	21;3	16;8	27	18120
41	25/04/2015	25;7	21;4	17;4	22	18450
42	26/04/2015	34;3	19;6	21;1	25	18795
43	27/04/2015	34;7	22;6	22;1	26	19175
44	28/04/2015	36;9	23;1	20;5	27	19475
45	29/04/2015	41;4	36;7	22;6	34	19845
46	30/04/2015	34;2	42;1	19;8	32	20145
47	01/05/2015	33;3	36;7	20;4	30	20480

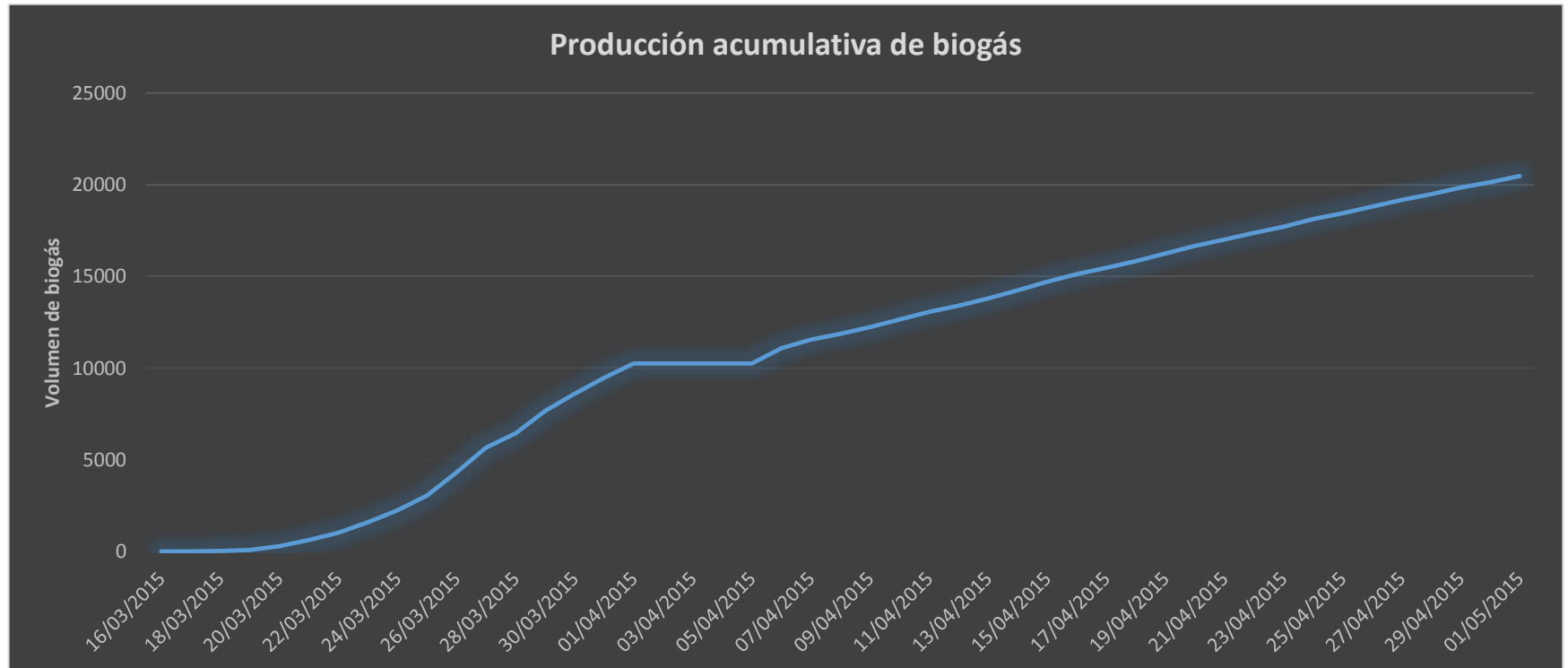
Autor: Andrés Paredes.





**TABLA 13**

**PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE BIOGÁS.**



**Autor: Andrés Paredes.**

A fin de determinar el tiempo de retención óptimo para el diseño del equipo se realizó además una “prueba de flama” tres veces a lo largo del proceso para comprobar la producción de metano utilizable como biogás mediante la presencia de la producción de una flama color azul.

La primera toma se realizó a los 15 días de iniciado el proceso de degradación en el cual se observó la presencia de una flama mínima de color amarillento demostrando la presencia de una baja cantidad de  $\text{CO}_2$ .

La segunda toma se realizó cumplidos los 30 días del proceso de degradación, en el cual se observó la presencia de una flama color amarillo intenso demostrando la presencia de una mayor cantidad de  $\text{CO}_2$ .

La última prueba se realizó a los 47 días de iniciado el proceso de degradación en el cual se observó la presencia de una flama con base azul demostrando así la presencia de  $\text{CH}_4$  en la mezcla combustible, dando a notar así la producción de biogás. Cabe recalcar que debido a la temperatura ambiente de  $18^\circ\text{C}$ , no favorece para que el tiempo de retención sea mínimo, y se genere mayor cantidad de metano.

## CAPÍTULO 3

### 3. DIMENSIONAMIENTO DEL BIORREACTOR.

Para realizar el dimensionamiento del biorreactor con una vida útil propuesta de 15 años, se procede a realizar la proyección poblacional futura del cantón Patate para dicha fecha, teniendo en cuenta los siguientes datos:

#### 3.1. POBLACIÓN FUTURA

Contando con una tasa de crecimiento poblacional ( $i$ ) de 1,52%, una población actual (según el último censo INEC 2010) de 13497 habitantes, y una proyección a 15 años, dada la vida útil de este tipo de reactor, tenemos:

$$\begin{aligned}P_f &= P_o x \left(1 + \frac{i}{100}\right)^T \\P_f &= 13947 x \left(1 + \frac{1,52}{100}\right)^{15} \\P_f &= 13947 x (1,0152)^{15} \\P_f &= 17488 \text{ hab}\end{aligned}$$

#### 3.2. CANTIDAD TOTAL DE MEZCLA DE RESÍDUOS:

Debido a que estamos realizando el tratamiento de los residuos orgánicos aplicaremos una relación de la mezcla con agua de 1:1 a fin de obtener una descomposición de residuos más eficiente.

Es decir que tenemos la cantidad de 1934,4 kg residuos orgánicos recolectados en las diferentes rutas por día y tendremos que añadir aproximadamente del mismo peso en agua (1935kg de agua para mayor facilidad), dándonos una mezcla de 3869,4 Kg mezcla/día.

CRE (Cantidad de residuos orgánicos diarios): 1934.4 Kg/día

CA (Cantidad de agua): Relación aproximada 1:1 → 1935 Kg/día

#### Residuos totales

$$Cm = 1934.4 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \left( \frac{17488\text{hab}}{13947\text{hab}} \right) = 2425.52 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

\*Mezcla total producida diariamente con la población actual del cantón.

Tomando la población proyectada a 15 años de vida útil del biorreactor:

#### Mezcla total

$$Cm = 1934.4 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 1935 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 3869.4 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{día}}$$

#### Mezcla total

$$Cm = 3869,4 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{día}} \times \left( \frac{17488\text{hab}}{13947\text{hab}} \right)$$
$$Cm = 4851,8 \frac{\text{kg mezcla}}{\text{día}}$$

### 3.3. VOLUMEN DEL BIODIGESTOR

El volumen del biodigestor los obtendremos con los datos del tiempo de retención y la cantidad de la mezcla total de los residuos orgánicos con la siguiente formula:

$$V = TR(DIAS) \times Cm \text{ (Cantidad de la mezcla)}$$

Cabe mencionar que la temperatura es la principal determinación del tiempo de retención, el tiempo de retención de biomasa se obtuvo de forma experimental en un modelo a escala, siendo este el tiempo en el cual se obtuvo biogás (metano, produciendo una flama azul) a partir de la descomposición de los residuos orgánicos.

Este tiempo fue de 47 días.

**DONDE:**

**TR (Tiempo de Retención):** 47 días.

NOTA: La recolección de residuos orgánicos se da tres días a la semana, la acumulación de residuos durante el tiempo de retención será por tanto la masa total de 16 días de recolección.

**Cm (Cantidad de la Mezcla):** 4851,8 L mezcla /Día

**Volumen del biorreactor**

$$V = 16 \text{ días} \times 4851,8 \frac{\text{l mezcla}}{\text{día}} = 77628.8 \text{ L de residuos orgánico}$$

Transformación de los litros en m<sup>3</sup> del volumen de los residuos orgánicos.

$$V = 77628.8L \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 L} = 77,6288m^3$$

**Nota:** Se debe añadir un volumen de seguridad (para almacenamiento del biogás generado) equivalente al 25% del volumen calculado del biorreactor.

$$V = 77,6288m^3 + (77,6288m^3 \times 25)$$

$$V = 97.036 m^3$$

El volumen de nuestro biodigestor de campana fija será, para facilidad de diseño, de 97 m<sup>3</sup> que se colocarán en la cámara de digestión para la producción de gas y bioabono.

### 3.4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Basándonos en la tabla de la producción de gas que genera el estiércol de cada animal y la cantidad exacta de los residuos orgánicos obtendremos cuanto de gas se producirá en el biodigestor.

En promedio de los residuos utilizados tenemos una producción de biogás de:

$$Bg = \frac{0.1836 \frac{m^3}{Kg} + 0.222 \frac{m^3}{Kg}}{2}$$

$$Bg = 0.203 \frac{m^3}{Kg}$$

**DONDE:**

$$Cr \text{ (Cantidad de residuos)} = 2425,52 \frac{Kg}{dia}$$

$$Cr \text{ (Cantidad de residuos)} = 38814,4 \frac{Kg}{47 \text{ días}}$$

$$Bg \text{ (Producción de biogás)} = 0,203 \text{ m}^3/\text{kg}$$

**Producción de gas**

$$Bg = 38814,4 \frac{kg}{mes} \times 0,203 \frac{m^3}{kg} = 7879.3 \frac{m^3 \text{ biogás}}{mes}$$

Se recomienda que se debe añadir del 5 al 10 % del margen de erros como factor de seguridad dando los siguientes resultados.

**Producción de gas**

$$Bg = 7879.3 \text{ m}^3 + (7879.3 \text{ m}^3 \times (0.1)) = 8667.2 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{mes}$$

### 3.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL BIODIGESTOR

Teniendo una geometría circular y el volumen del biodigestor calculado se partirá a dimensionar las diferentes cámaras siendo que la forma ayuda que no se realice la pérdida del gas en las esquinas, facilitando que en su construcción requiera menor cantidad de materiales.

### 3.6. CÁMARA DE DIGESTIÓN

Teniendo el volumen procederemos al cálculo de la profundidad y el diámetro de la cámara de digestión tomando en cuenta que es circular, se propone una altura de 3,5m a fin de facilitar la limpieza del mismo, por tanto:

**DONDE:**

**V (Volumen del Biodigestor)= 97 m<sup>3</sup>**

$$V = \frac{(\pi * d^2)}{4} \times h$$

Despejando el d (diámetro) obtendremos.

Para  
de

$$d = \sqrt[2]{\frac{V \times 4}{\pi \times h}}$$

facilidad

$$d = \sqrt{\frac{97 \text{ m}^3 * 4}{3,14 \times 3,5 \text{ m}}} = 5,566 \text{ m}$$

$$d = 5,94 \text{ m}$$

construcción aproximaremos el diámetro a 6m y con este procedemos a calcular con la altura real del biodigestor

$$V = \frac{(\pi * d^2)}{4} \times h$$

Remplazando

Para mayor facilidad aproximaremos la altura a 3,5m.

$$h = \frac{V * 4}{\pi * d^2}$$

$$h = \frac{97 \text{ m}^3 * 4}{3,1415 * (6\text{m})^2} = 3.43\text{m}$$

El diámetro final del biorreactor será, para mayor facilidad de 6.2m aumentándole un espesor de 20cm de hormigón a su construcción, de igual manera su altura final será de aproximadamente 3,70m aumentándole 20cm de hormigón para la construcción de su base.

### 3.7. CÁMARA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA

La forma de las cámaras de alimentación y descarga son de forma cuadrada facilitandola mezcla de los residuos con el agua, para su cálculo se toma en cuenta la carga de mezcla diaria de residuos orgánicos generada.

**DONDE:**

**Cd (Carga diaria)=** 4,852 m<sup>3</sup> de mezcla diaria

$$Lcp = \sqrt[3]{Cd}$$

$$Lcp = \sqrt[3]{4,852 \text{ m}^3} = 2,203\text{m}$$

Cada lado de la cámara de alimentación y descarga tendrá, para facilidad de construcción 2,21m de longitud, así como de ancho y altura abasteciendo la carga diaria de producción de residuos orgánicos, se añadirá un margen de seguridad a las medidas de la misma de 0,1m para evitar que la carga rebose de la cámara.



### 3.8. DISEÑO DE LA CÚPULA.

Para el cálculo de la cúpula se requiere la producción del gas diario que se genera en el biodigestor.

**DONDE:**

**Cr (Cantidad de residuos)** = 2425,52 Kg/día

**Bg (Producción de biogás)** = 0,203 m<sup>3</sup>/kg

**Ga (Producción del gas)** = 492,3814 m<sup>3</sup> de Biogás/día

Para el cálculo de producción que se realizará dentro de la cúpula se dividirá en dos secciones del mismo tamaño.

$$G_{in} = \frac{Ga}{2} = \frac{492,3814m^3}{2} = 246,2285 m^3 \text{ biogás/día}$$

Para el diseño de la cúpula del biorreactor se ha tomado como base el cálculo de una unidad proporcional la cual es equivalente un cuarto del radio total del reactor, mediante la cual, al aplicar una relación aritmética, podemos calcular las dimensiones de la cúpula de nuestro biorreactor. (Guardado, 2007)

La unidad proporcional equivale a un cuarto del radio total del reactor, para lo cual primero calculamos el radio del mismo.

**Radio:**

$$r = \frac{d}{2} = \frac{6m}{2} = 3m$$

**Unidad proporcional:**

$$U = \frac{r}{4}$$

$$U = \frac{3m}{4}$$

$$U = 0,75m$$

**Altura de la campana:**

$$h_c = 2 \times U$$

$$h_c = 2 \times 0,75m$$

$$h_c = 1,5m$$

R=

Angulo propuesto para la construcción de la cúpula  $\alpha = 15$

### **3.9. COMPUERTA DE LIMPIEZA**

La compuerta por donde se ingresará a dar un mantenimiento y limpieza estará localizada en la parte superior de la campana de mampostería con las siguientes dimensiones 0.8m de largo y ancho para una mayor comodidad del trabajador, esta posee una cubierta de un caucho para evitar la fuga del gas.

### **3.10. RESULTADOS.**

Una vez realizados los cálculos para el dimensionamiento del biorreactor, se llegaron a obtener los siguientes valores para el diseño del mismo:

- Volumen total:  $97\text{m}^3$
- a
- Diámetro del biorreactor: 6m
- Dimensiones de las cámaras de entrada y salida del reactor: 2,21m
- Altura de la cúpula para almacenamiento de biogás: 1,5m
- Altura final: 5m.

Debe considerarse que el espesor de las paredes del biorreactor es de 20cm en hormigón armado.

Las tuberías a utilizarse variarán en cuanto a su material y dimensiones para cada una de las funciones que desempeñará, de la siguiente manera:

#### **Estructura de las tuberías de entrada y salida.**

- Tubería de alimentación: Será de un diámetro de 30cm a fin de realizar una alimentación fácil de los residuos orgánicos al interior del reactor.
- Tubería de descarga: Será de un diámetro de 2" ya que no es necesario un gran diámetro para la descarga del bioabono líquido.

Las tuberías de alimentación y descarga serán de PVC a fin de evitar daños a la misma por corrosión al contacto con el agua de la mezcla que ingresará y ya que ésta no sufrirá daños por parte de agentes externos como movimientos bruscos o rayos solares.

#### **Estructura de la tubería de gas**

La tubería para la conducción del gas será de acero inoxidable de 1½ pulgada con una longitud de 25m a fin de llevar al gas a la zona de almacenamiento en el área de construcción.

Se ha tomado este diámetro de tubería a fin de evitar una pérdida significativa de presión durante la conducción del biogás y se ha considerado al acero inoxidable como el material óptimo ya que a pesar de su mayor costo nos brinda una mayor resistencia frente a factores ambientales como rayos solares y posibles movimientos producidos por parte de maquinaria pesada de la zona.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Mediante técnicas cuantitativas, se llegó a determinar que en el Cantón Patate se producen 1934.4 Kilogramos de residuos orgánicos diariamente, al conocer que el sistema de recolección de residuos del Cantón trabaja sobre residuos orgánicos exclusivamente los días martes, jueves y sábado.
- Se identificó la presencia de bacterias metanogénicas luego de transcurrido el tiempo de degradación de los residuos orgánicos presentes en el biorreactor, ya que al realizar la última prueba de flama existió la presencia de una flama azul en su base, demostrando la presencia de biogás de metano.
- Luego de realizado el modelo experimental, y conociendo el total de la producción de residuos orgánicos por parte del cantón Patate, se llegó a obtener un tiempo de retención óptimo de 47 días, con el cual se llevó a cabo, mediante técnicas cuantitativas, el cálculo de los diferentes parámetros necesarios para realizar el diseño del biorreactor como son:
  - Volumen:  $97\text{m}^3$
  - Diámetro: 6m
  - Altura: 3.5m
  - Cámara de entrada y salida: 2,21m
  - Altura de la cúpula de almacenamiento de biogás: 1,5m
- Se encontró, luego de realizada la prueba experimental piloto del biorreactor, que a partir de 1Kg de residuos orgánicos, existió una producción total de 20480ml de biogás en sus 47 días de retención, lo cual nos resulta en una producción de biogás diaria aproximadamente de 436ml.

- Dentro de tablas, sabemos que en lo referente a residuos orgánicos (Residuos domésticos más residuos animales o estiércol), existe una producción teórica de  $0,203 \frac{m^3 \text{ biogás}}{Kg}$ . Luego de realizado el modelo experimental con 1 Kg de residuos sólidos, se contó con una producción de biogás de  $0,20480 m^3$  una vez transcurrido el tiempo de retención de 47 días, es decir  $0,2048 \frac{m^3 \text{ biogas}}{Kg}$ , por tanto podemos concluir que al ser un valor muy similar a la producción promedio, el proceso experimental ha sido satisfactorio.
- Mediante el diseño de este biorreactor se propone una alternativa para minimizar el impacto del vertido de los residuos orgánicos, logrando convertirlos en materia prima utilizable para la obtención de productos aprovechables, como son bioabono utilizable en la agricultura, así como biogás, el cual mediante un sistema de almacenamiento adecuado puede utilizarse como combustible por parte de la comunidad.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para mayor facilidad de operación el biorreactor deberá ubicarse cerca de la zona de descarga de residuos dentro del área seleccionada.
- Se deberá contar con una fuente cercana de agua a fin de facilitar la mezcla de ésta con la materia orgánica que será utilizada como sustrato en nuestro reactor, pero a una distancia mínima de 3 metros para evitar cualquier riesgo de contaminación de la misma con los materiales o efluentes producidos en el proceso de degradación.
- La construcción del biorreactor deberá probar ser lo más hermética posible a fin de evitar fugas de gas así como para garantizar una temperatura lo más controlada y estable posible, dando una mejor eficiencia en el proceso de degradación de los residuos orgánicos presentes.

- El biorreactor deberá construirse en la zona lo más elevada posible del terreno a fin de asegurar la llegada de la mayor cantidad de rayos solares al mismo a fin de garantizar una mayor temperatura para la degradación de la materia orgánica y por tanto una mayor rapidez en la misma, logrando una mayor y mejor producción de biogás.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ATKINSON, B. (1983).** Reactores Bioquímicos. Reverté.
2. **FOUST, S. (1990).** Principios de Operaciones unitarias. México: Continental.
3. **Infante, P. D. (2002).** Estudio de la contaminación por metales pesados en sedimentos y ostiones de la Bahía de Manzanillo, Cuba. *Revistas Científicas de America Latina*, 46, 357-361.
4. **Marañón, E. (1998).** *Generación de residuos de ganadería vacuna en asturias. Problema y tratamiento.* Asturias: Servicio de publicaciones Universidad de Oviedo.
5. **Revolorio, H. I. (2010).** Diseño de un bioreactor de membrana para la generacion de las aguas residuales en un establecimiento hotelero. Guatemala.
6. **Revolorio, H. I. (Mayo de 2010).** *Diseño de un bioreactor de membrana para la regeneración de las aguas residuales en un establecimiento hotelero.* Recuperado el 06 de 06 de 2014, de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3130\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3130_C.pdf)
7. **Rojas, J. R. (1994).** Lagunas de estabilización de aguas residuales. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.



## NETGRAFÍA

1. **Alkalay, D. (2014).** *APROVECHAMIENTO DE DESECHOS AGROPECUARIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA*. Recuperado el 20 de 11 de 2014, de <http://www.fao.org/docrep/006/ad098s/AD098S08.htm>
2. **Ballester, A. (s.f.). (U. d. Complutense, Productor)** Recuperado el 30 de 05 de 2014, de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/biohidro/Publicaciones%20del%20Grupo/Libro%20Valparaiso%20Tecnologias%20Biomineras.pdf>
3. **Basurto, A. D. (2013).** *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya en Bolivia*. Recuperado el 02 de 06 de 2014, de <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/20647>
4. **Cáceres, E. (2010).** *Producción de biogás. Construcción de un bioreactor*. Recuperado el 03 de 05 de 2014, de <http://www.mailxmail.com/curso-produccion-biogas-construccion-biodigestor/biodigestor-componentes>
5. **Desechos sólidos orgánicos. (2007).** Recuperado el 05 de 06 de 2014, de <http://www.desechos-solidos.com/desechos-solidos-organicos.html>
6. **DiBlaci, E. (2004).** *Energías Limpias, Biogás*. Recuperado el 07 de 06 de 2014, de [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN\\_JUAN/676/otras\\_energias/biogas/Index\\_biog.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/otras_energias/biogas/Index_biog.htm)
7. **Fundacion3CIM. (2008).** *Proyecto ERGEO para tratamiento de bioabonos como alternativa biotecnológica de uso de residuos orgánicos para fermentar pastos*. Recuperado el 04 de 05 de 2014, de <http://www.dicyt.com/noticias/cartif-participa-en-el-desarrollo-de-un-sistema-de-tratamiento-de-residuos-organicos-para-obtener-biogas-y-fertilizantes>

8. **Gonzales, E. (2007).** *Fundamentos de diseño de reactores*. Recuperado el 04 de 06 de 2014, de [http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria\\_quimica/reactorquimico/default3.asp](http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_quimica/reactorquimico/default3.asp) .
9. **Guardado, J. (2007).** *Obtenido de Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas.:*  
[http://www.ideassonline.org/public/pdf/CUBASOLAR\\_Disenoyconstrucciondeplantas\\_de\\_biogas.pdf](http://www.ideassonline.org/public/pdf/CUBASOLAR_Disenoyconstrucciondeplantas_de_biogas.pdf)
10. **Guevara, A. (1996).** *Fundamentod básico para el diseño de biodigestores anaeróbicos Rurales*. Recuperado el 01 de 11 de 2014, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>
11. **IPADE, F. (2011).** *Como constituir Empresas Municipales Mancomunadas de Aseo Integral*. Recuperado el 20 de 05 de 2014, de <http://www.fundacion-ipade.org/upload/pdf/EMMAI.pdf>
12. **Lara, A. P. (2011).** *Manual para el manejo de desechos sólidos en la Unidad Educativa Darío Guevara, parroquia Cunchibamba, Cantón Ambato*. Recuperado el 21 de 05 de 2014, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1298/1/26T00005.pdf>
13. **Lara, E. S. (2011).** *Diseño de un bioreactor y conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación Tunshi- EsPOCH*. Recuperado el 22 de 05 de 2014, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1652/1/236T0056.pdf>
14. **López, C. (2009).** *Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio contínuo para el laboratorio de ingeniería química de la facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana*. Recuperado el 2014, de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/12345678/932/1/LopEZ%20MENDOZA%20CLAUDIA.pdf>
15. **Lopez, D. (06 de 2011).** *Diagnóstico, caracterización y propuesta de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Ambato*. Recuperado el 22 de 05 de 2014, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3952/1/CD-3713.pdf>

16. **Martínez, C. (2014).** *Dimensiones de un biodigestor de campana flotante (tipo hindú).* Recuperado el 2014, de <http://www.monografias.com/trabajos82/biodigestores-campana/biodigestores-campana.shtml>
17. **Méndez, C. L. (2008).** *Biomasa: alternativa sustentable para la producción de Biogás.* Recuperado el 06 de 06 de 2014, de <http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa.shtml>
18. **Navarro, P. (1995).** *Residuos orgánicos y agricultura.* Recuperado el 07 de 06 de 2014, de <http://publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/LD84790819458992131.pdf>
19. **OPSur. (06 de 02 de 2010).** *Biogás, una fuente Alternativa y Limpia.* Recuperado el 10 de 11 de 2014, de <http://www.opsur.org.ar/blog/2010/02/06/biogas-una-fuente-alternativa-y-limpia/>
20. **PLAMGAS. (2012).** *Desarrollan una planta modular para el tratamiento de residuos orgánicos.* Recuperado el 04 de 05 de 2014, de <http://www.dicyt.com/noticias/desarrollan-una-planta-modular-para-el-tratamiento-de-residuos-organicos>
21. **Poggio, D. d. (2009).** *Manual de instalación de un biodigestor familiar tipo manga para zonas alto-andinas.* Recuperado el 04 de 05 de 2014, de [https://grecdh.upc.edu/publicacions/manuals-tecnics/documents/m01\\_guia-de-instalacion-para-yachachiq.pdf](https://grecdh.upc.edu/publicacions/manuals-tecnics/documents/m01_guia-de-instalacion-para-yachachiq.pdf)
22. **Proaño, D. V. (2008).** *Producción y evaluación de cuatro tipos de bioabonos como alternativa biotecnológica de uso de residuos orgánicos para la fertilización de pastos.* Recuperado el 22 de 05 de 2014, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1503/1/17T0873.pdf>
23. **Revolorio, H. I. (Mayo de 2010).** *Diseño de un bioreactor de membrana para la regeneración de las aguas residuales en un establecimiento hotelero.* Recuperado el 06 de 06 de 2014, de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3130\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3130_C.pdf)

24. **Suárez, D. (2010).** *Diseño y construcción de un biorreactor batch aerobio para cultivo de bacterias biodegradadoras de petróleo.* Recuperado el 2014, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2651/1/96T00138.pdf>
25. **Tarco, F. (2011).** *Diseño de un Biodigestor para el tratamiento de los residuos albañiles generados en la residencia de la universidad de Pinar del Río como una alternativa energética para el cocido de alimentos.* Recuperado el 03 de 11 de 2014, de <http://repositorio.utC.edu.ec/bitstream/27000/611/1/T-UTC-1076.pdf>
26. **Verdezoto, D. E. (2014).** *Diseño de un biodigestor anaerobio para la producción de biogás a partir de las excretas de ganado vacuno, en la finca lod Laureles en la Comunidad Flor del Manduro.* Recuperado el 03 de 06 de 2014, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3279/1/236T0088.pdf>

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### Construcción del modelo experimental piloto



Pesaje de residuos orgánicos



Toma de agua para la mezcla



Mezcla de residuos orgánicos con agua



Materiales utilizados para el modelo piloto



Realización de puertos de entrada para la manguera y termómetro.



Manguera de salida de biogás



Materiales utilizados para el aislamiento térmico del modelo experimental



Recubrimiento del recipiente con paja como aislante térmico.



Modelo experimental piloto terminado, mostrando medidas de temperatura

Autor: Andrés Paredes.



## ANEXO B

### Medición de biogás



Mediciones de biogás mediante la técnica de probeta invertida.

Autor: Andrés Paredes.

## ANEXO C

### Prueba de la Flama



Prueba inicial de la flama, con una mínima llama amarilla



Segunda prueba de la flama, aún con llama amarilla



Prueba de la flama, donde se demuestra la presencia de metano (fuego azul)

**Autor:** Andrés Paredes.

## ANEXO D

### Relleno Sanitario EMMAIT-EP



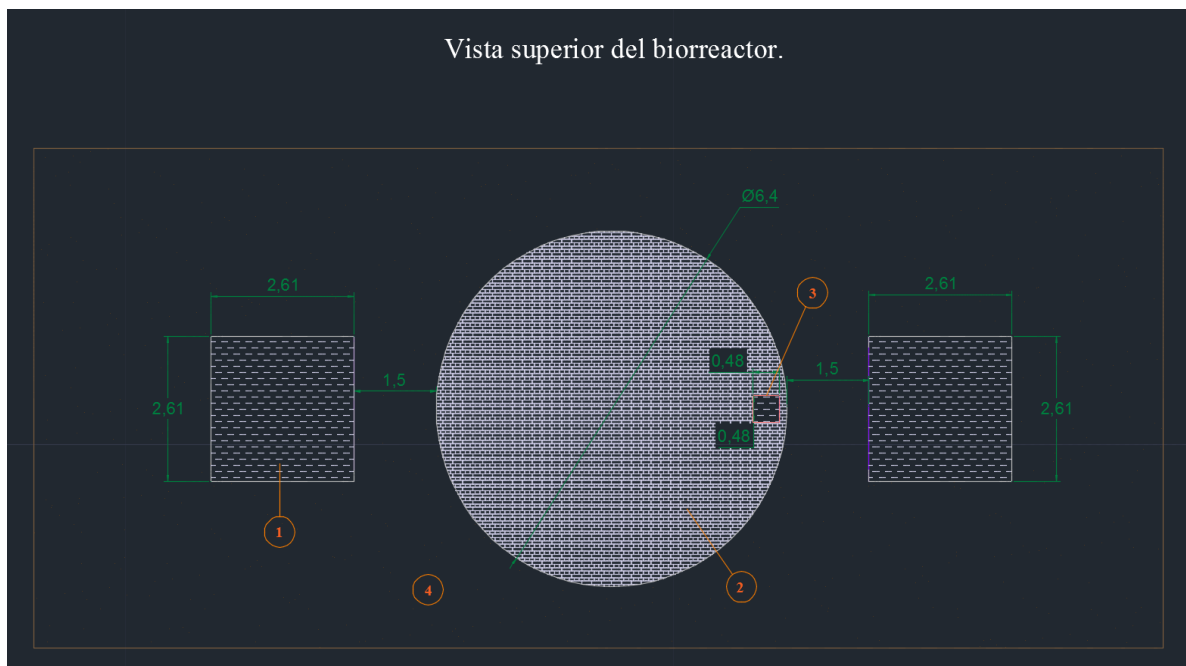
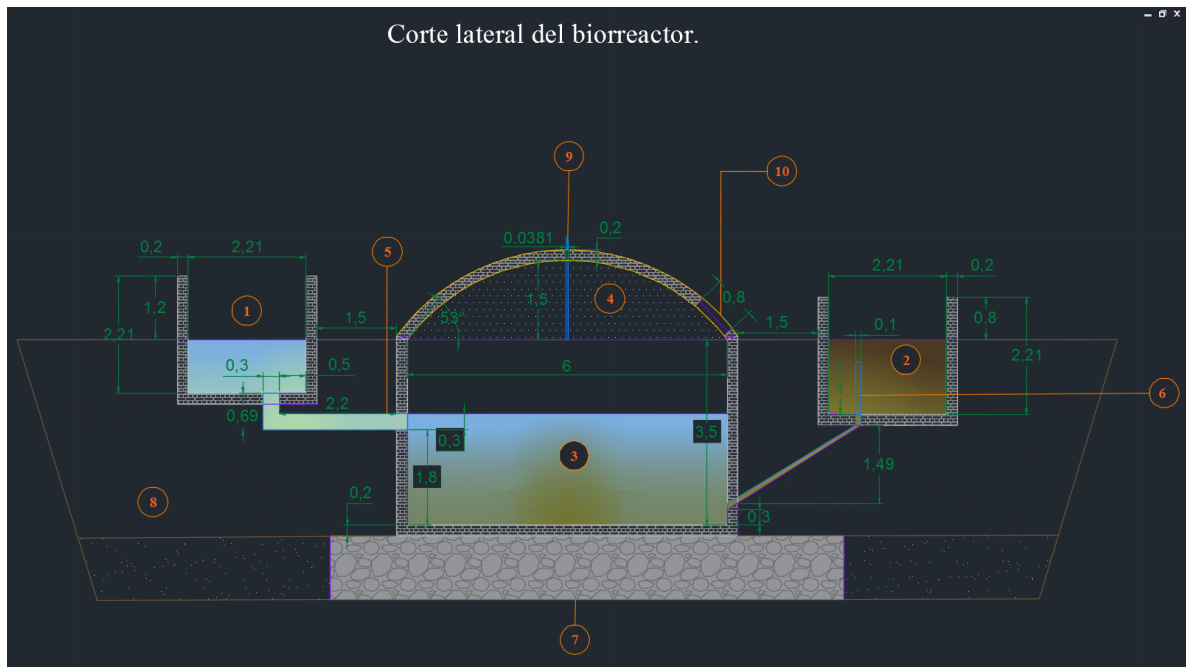
Instalaciones del relleno sanitario de la EMMAIT-EP



Zona tentativa de construcción del biorreactor.

Autor: Andrés Paredes.

## PLANOS



Vista en planta del biorreactor.

